

Trabajo Fin de Máster

Análisis y optimización de parámetros de diseño de
vehículos eléctricos utilizados para la distribución
urbana de mercancías

Analysis and optimization of designing parameters
of electric vehicles used for urban freight
distribution

Autor/es

Raúl Chueca González

Director/es

Emilio Larrodé Pellicer
David Escuin Finol

EINA
2018



DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD

(Este documento debe acompañar al Trabajo Fin de Grado (TFG)/Trabajo Fin de Máster (TFM) cuando sea depositado para su evaluación).

D./D^a. RAÚL CHUECA GONZÁLEZ,

con nº de DNI 25203295X en aplicación de lo dispuesto en el art.

14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster)
MÁSTER, (Título del Trabajo)

ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DE PARÁMETROS DE DISEÑO DE VEHÍCULOS
ELÉCTRICOS UTILIZADOS PARA LA DISTRIBUCIÓN URBANA DE MERCANCÍAS

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada debidamente.

Zaragoza, 16 de SEPTIEMBRE de 2018

Fdo: RAÚL CHUECA GONZÁLEZ

Análisis y optimización de parámetros de diseño de vehículos eléctricos utilizados para la distribución urbana de mercancías

RESUMEN

La motivación de este proyecto es el estudio mediante el desarrollo de unas funciones objetivo, de la mejor distribución urbana de mercancías para una flota de vehículos 100% eléctrica y un escenario definido. Para poder evaluar y analizar las distintas alternativas se ha desarrollado una herramienta que permite procesar las distintas situaciones a la par que realizar estudios de sensibilidad de los diferentes parámetros que influyen.

En primer lugar se ha definido el problema a resolver así como los distintos parámetros que influyen en la distribución urbana de mercancías como son la distancia recorrida, el tipo de vehículo (consumo, velocidad, autonomía, carga útil,...), el tiempo de descarga del material, el escenario, el coste de la electricidad y personal,... entre otros. En el presente trabajo se ha supuesto una flota de 5 vehículos pequeños y 5 vehículos grandes.

Una vez se han definido los distintos factores a considerar, se han desarrollado unas funciones objetivo para evaluar cada una de las alternativas de distribución de mercancías. Se han definido dos funciones distintas, la primera considera el consumo del vehículo y la segunda tiene en cuenta tanto el consumo del vehículo como el coste de personal.

Seguidamente y una vez definidas las funciones objetivo, se han definido los escenarios de estudio. Por un lado se ha definido un escenario de dimensiones pequeñas/medianas (Zaragoza) y por otro, un escenario de mayores dimensiones (Berlín). En ambos escenarios se desea repartir mercancía a 20 puntos repartidos por la superficie de toda la ciudad. En cada uno de los escenarios se han realizado dos ensayos distintos, uno considerando que el origen de todas las rutas de reparto se encuentra en un punto céntrico de la ciudad y otro en el cual, el punto de partida se encuentra a las afueras de la ciudad.

Una vez el problema queda definido, con ayuda del Solver desarrollado por G. Erdogan se han calculado las distancias óptimas en cuanto a distancia se refiere para diferentes combinatorias de vehículos (10 combinaciones en total, optimizadas con el fin de considerar todas las opciones posibles). Seguidamente se han introducido estas secuencias en la herramienta desarrollada para obtener la distribución óptima según cada una de las funciones objetivo definidas.

Tras realizar el estudio se ha llegado a la conclusión de que en la actualidad, debido a la baja influencia del consumo eléctrico frente al coste de personal, la distribución óptima es aquella en la cual los vehículos recorren menor distancia, es decir, la distribución en la que se emplean vehículos grandes. Sin embargo, en un futuro posible en el cuál el factor humano sea prescindible (vehículos autónomos), la distribución óptima para los escenarios planteados sería aquella en la que se utilizan exclusivamente vehículos pequeños (cabe destacar que esta distribución es la peor en el panorama actual).

TABLA DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN	6
1.1 Objeto y justificación	6
1.2 Alcance del proyecto	7
1.3 Estado del arte	7
1.4 Metodología de trabajo	8
1.5 Contenido del proyecto	9
2. LA OPERATIVA DE DISTRIBUCIÓN DE MERCANCÍAS Y EL VEHÍCULO ELÉCTRICO.....	10
2.1 La logística urbana de distribución de mercancías e importancia del vehículo eléctrico	10
2.2 El vehículo eléctrico	11
3. MATERIAL Y MÉTODO.....	13
3.1 Definición del problema	13
3.1.1 Vehículos	14
3.1.2 Consumo específico de los vehículos	15
3.1.3 Freno regenerativo	15
3.1.4 Velocidad crucero de los vehículos	15
3.1.5 Factor k	16
3.1.6 Tiempo de descarga del material	16
3.1.7 Escenarios.....	16
3.1.8 Coste del consumo eléctrico	17
3.1.8.1 Escenario pesimista	18
3.1.8.2 Escenario realista.....	18
3.1.9 Coste personal	19
3.2 Funciones a optimizar	19
3.2.1 Función objetivo de consumo (f_1).....	19
3.2.2 Función objetivo operativa (f_2)	20
3.3 Herramienta desarrollada y método de cálculo	21
3.3.1 Resultados	22
3.3.2 Distribuciones óptimas.....	22
3.3.3 Consumo específico de los vehículos	24
3.3.4 Coste consumo eléctrico	24
3.3.5 Coste personal.....	24
4. DEFINICIÓN DE LOS ESCENARIOS	25
4.1 Introducción.....	25
4.2 Escenario A: Zaragoza	25
4.2.1 Introducción	25
4.2.2 Establecimiento de puntos de reparto y de la demanda	25
4.2.3 Velocidad crucero.....	26
4.2.4 Factor k	27
4.2.5 Tablas de consumo	28
4.3 Escenario B: Berlín	29
4.3.1 Introducción	29
4.3.2 Establecimiento de puntos de reparto y de la demanda	29
4.3.3 Velocidad crucero.....	30

4.3.4 Factor k.....	30
4.3.5 Tablas de consumo.....	31
5. RESULTADOS.....	32
5.1 Introducción.....	32
5.2 Escenario A	32
5.2.1 Escenario A1.....	32
5.2.2 Escenario A2	34
5.3 Escenario B.....	36
5.3.1 Escenario B1	36
5.3.2 Escenario B2	38
6. CONCLUSIONES.....	40
6.1 Comparación consumo VP y VG	40
6.2 Panorama actual.....	40
6.3 Panorama futuro	43
6.4 Síntesis de las conclusiones.....	44
6.5 Futuras líneas de investigación.....	45
BIBLIOGRAFÍA	46
ÍNDICE FIGURAS.....	49
ÍNDICE TABLAS.....	50
ANEXO 1: DISEÑO DE LOS VEHÍCULOS.....	53
ANEXO 2: VRP SPREADSHEET SOLVER	60
ANEXO 3: EXCEL HERRAMIENTA PARA EL ESTUDIO DE LAS FUNCIONES OBJETIVO.....	63
ANEXO 4: SECUENCIA DE RUTAS DETALLADA	66

1. INTRODUCCIÓN

1.1 OBJETO Y JUSTIFICACIÓN

En el presente proyecto se han desarrollado unas funciones objetivo con el fin de valorar a través de su análisis la mejor distribución de mercancías para una flota de vehículos determinada 100% eléctrica. Para ello se ha desarrollado una herramienta de optimización y toma de decisiones para distribuciones capilares, en un entorno determinado y para una flota previamente definida. Se ha utilizado una flota 100% eléctrica ya que para poder realizar un análisis de los parámetros y escenarios es necesario que los vehículos utilicen la misma tecnología. En dicha optimización se tiene en cuenta una gran cantidad de parámetros de los cuáles se estudia en profundidad la tipología de los vehículos, la velocidad crucero, la distribución del entorno y sus características, el coste de la electricidad y la localización del punto de partida de los vehículos estudiando la posibilidad de poner en práctica técnicas de gestión de proyectos logísticos como la integración de almacenes en el centro de la ciudad [1].

Estas funciones objetivo que se han desarrollado, en realidad, son funciones de coste de distribución de mercancía en entornos urbanos. Ante el cambiante entorno tecnológico se han definido y desarrollado dos funciones objetivo distintas, una de ellas centrada únicamente en el consumo del vehículo sin tener en cuenta el factor humano y otra teniendo en cuenta la operativa de distribución de mercancías completa siempre bajo la suposición de que los vehículos están en propiedad y la plantilla de trabajadores es fija.

La necesidad de este proyecto surge por un lado por el aumento y la importancia de la logística sobre los beneficios y coste del producto final. Como concluyó Ballou [2], la logística asociada al producto final supone a nivel empresarial entre la sexta y la cuarta parte de las ventas y entre uno y dos tercios del costo logístico. Además según el estudio realizado por GPT Group [3] para el año 2020 el 80% de los bienes serán manufacturados en países distintos a los de origen. Esto afecta a la logística en todos sus niveles: primario (se abastece desde una fábrica a plataformas, mayoristas o almacenes centrales), secundario (distribución a almacenes menor o minoristas) y capilar (distribución a los puntos de venta). Son numerosos los autores, como Duckler [4], que ponen de manifiesto y definen las actividades logísticas como “la última barrera para obtener economías en los costos”

Por otro lado, las emisiones de gases de efecto invernadero están aumentando peligrosamente a nivel global [5] por lo que se están empezando a tomar medidas que permitan reducir estos niveles. Entre las medidas que se están llevando a cabo destacan entre otras: el consumo de energías renovables, prácticas una movilidad sostenible y la reducción la huella de carbono.

Las herramientas resolución de ruteado de vehículos tratadas en este proyecto son de ayuda para la optimización de la distribución por lo que su uso puede suponer un gran ahorro y competitividad dentro del sector.

En resumen, esta necesidad surge de la alta demanda de este servicio y de la importancia que tiene la distribución y logística sobre los beneficios obtenidos por la empresa manufacturera por un producto. Además de la necesidad inminente de reducir los niveles de CO₂ a nivel global. Es por ello que es necesario optimizar al máximo los recursos con el fin de poder dar servicio a la demanda variable de la forma más económica y sostenible posible.

1.2 ALCANCE DEL PROYECTO

El presente proyecto se centra en la optimización de la distribución capilar para un escenario y flota de vehículos determinada. Los criterios de optimización vienen definidos a través de la aplicación de unas funciones objetivo que se aplican a las distribución a través de la herramienta desarrollada. Esta herramienta forma parte del objeto del proyecto permitiendo el análisis de las funciones objetivo:

- Gestionar simultáneamente 10 posibles distribuciones con 2 tipologías de vehículos distintas (un vehículo con capacidad de reparto de hasta en 4 puntos y otro en 8).
- Variar los siguientes parámetros para realizar un análisis de sensibilidad: coste de la electricidad, velocidad crucero, coste de personal, tiempo de parada, efecto del freno regenerativo y factor de mayoración “k”.

Las funciones objetivo definidas son dos, una de ellas tiene en cuenta el consumo energético y la otra tiene en cuenta el consumo energético y el coste del personal.

Se contemplan en el estudio los siguientes parámetros: vehículos, consumo específico, freno regenerativo, velocidad crucero, factor de mayoración “k”, tiempo de descarga del material, escenarios, coste de la electricidad y coste de personal.

Respecto a la flota de vehículos, está formada por 5 vehículos pequeños y 5 vehículos grandes de características bien definidas. El vehículo pequeño dispone de capacidad para transportar mercancía para 4 puntos y una autonomía de 200 km. Respecto al vehículo grande puede repartir mercancía a 8 puntos y una autonomía de 150 km.

Se han estudiado dos escenarios distintos permitiendo estudiar el comportamiento de las funciones objetivo y herramienta desarrollada ante distintas situaciones. Los dos escenarios estudiados se corresponden a un entorno urbano (uno de los escenarios es Zaragoza, una ciudad pequeña/mediana y el otro Berlín, una ciudad de grandes dimensiones), con 20 puntos a los que abastecer de mercancía cada uno y un único punto de partida y llegada. Cada uno de los escenarios posee dos variantes (distinta posición del punto de partida/llegada). Además la mercancía a distribuir en cada punto es fija e igual en todos los puntos (200 kg). El material es suministrado de una sola vez y por un único vehículo. Las distancias entre puntos consideradas son euclídeas.

Para el cálculo del consumo energético se tiene en cuenta la carga que posee el vehículo en cada tramo. De esta forma se conoce el consumo específico del vehículo en todo momento.

1.3 ESTADO DEL ARTE

Son varios los enfoques estudiados para la optimización de redes logísticas centradas en el transporte urbano de personas y mercancías, a distinguir entre TSP (Traveling Salesman Problem), CPP (Chinese Postman Problem) y, el objeto de estudio de este proyecto, VRP (Vehicle Routing Problem). Estos métodos permiten la optimización de rutas de distribución para vehículos que deben de repartir mercancía en puntos concretos dispersos geográficamente, siempre y cuando se conozcan características básicas de la operativa logística como son las características de los vehículos (carga máxima, capacidad volumétrica del maletero,...), de la mercancía a repartir (tamaño, peso, fragilidad) y del cliente (horario de reparto, lugar de depósito de la mercancía,...) entre otras.

El TSP o problema del viajero se trata de un problema el cuál plantea un escenario en el que se debe recorrer un número de ciudades, pasando por cada una de ellas una sola vez y volviendo al origen al finalizar. Este problema ha sido abordado por numerosos investigadores como Lin Kernighan [6] [7], Keld-Hesgaun [8] o Marco Dorigo et al [9]. Este último se inspiró en la distribución de las colonias de hormigas a la hora de recoger alimentos. Algunas aplicaciones de la solución computacional a este problema son el enrutamiento de vehículos, programación del trabajo en tiendas y clustering¹ entre otras [10].

Otra variación es el CPP o problema del cartero, el cual consiste en encontrar el camino más corto que recorre todas las aristas de un grafo conectado que pase al menos una vez por cada arista volviendo al punto de partida. J. Edmonds y E.L. Johnson publicaron uno de los artículos más importantes escritos al respecto [11]. Algunas de las aplicaciones de este problema es la planificación de rutas de bus o de camiones de recogida de basuras [12].

El VRP es una generalización del ya comentado TSP. Se trata de un problema de optimización combinatoria que plantea la ruta óptima de distribución a una serie de clientes con unas determinadas características, con una serie de vehículos y pudiendo establecer varios puntos de partida. Este problema fue definido e investigado por primera vez por G. Dantzig y J. Ramser [13] a lo que siguieron mejoras destacables al algoritmo como la desarrollada por Clarke y Wright [14] o C. Prins [15]. Una variante de este problema es el conocido como VRP con ventanas temporales o VRPTW, en el cual se tienen en cuenta las ventanas temporales, es decir, la disponibilidad horaria de cada punto de reparto. Numerosos autores han desarrollado algoritmos teniendo en cuenta este factor entre los que destacan M. Solomon [16] y M. Desrochers [17].

Respecto a la forma de aplicar estos algoritmos desarrollados, existe numeroso software que permite resolver todo este tipo de casuística como jsprit [18], OptaPlanner [19], SINFONÍA [20] o el empleado en este proyecto “VRP Spreadsheet Solver” desarrollado por G. Erdogan [21] entre otros.

Dentro de la tipología de problemas VRP existen multitud de tipologías: capacitado, multidepósito, periódico, estocástico, backhauls, entrega y reparto, de ventanas temporales,... [22] o la combinación de alguno de los anteriores. Cada uno de ellos tiene una tipología de resolución distinta.

1.4 METODOLOGÍA DE TRABAJO

El proyecto se divide en las fases que se detallan a continuación:

- Fase 1. Documentación acerca de antecedentes y soluciones planteadas a lo largo del tiempo para el problema de enrutamiento de vehículos.
- Fase 2. Establecimiento de las hipótesis del problema que se plantea así como la definición de las características técnicas de los vehículos y las variables a tener en cuenta.
- Fase 3. Establecimiento de las funciones objetivo las cuáles reflejan la influencia de cada una de las variables.
- Fase 4. Parametrización de las variables de diseño que afectan a las prestaciones del vehículo.

¹ El clustering consiste en el agrupamiento de un conjunto de objetos, que no han sido etiquetados, en subconjuntos de objetos

- Fase 5. Definición de los diferentes escenarios de comparación.
- Fase 6. Análisis y evaluación de las funciones de coste que optimiza la operación logística a través de la herramienta desarrollada
- Fase 7. Obtención de resultados y conclusiones acerca de los análisis sobre las funciones de coste analizadas.

1.5 CONTENIDO DEL PROYECTO

En primer lugar, en el primer capítulo se refleja el objeto y justificación, alcance del proyecto y estado del arte seguido de un capítulo introductorio al tema de la operativa de distribución de mercancías y el vehículo eléctrico (capítulo 2).

En el siguiente capítulo se detalla y define punto por punto el problema a tratar, realizando los cálculos y dimensionamientos pertinentes. Además se definen las funciones a optimizar y se detalla tanto la herramienta desarrollada como el software de optimización empleado (capítulo 3).

A continuación se definen los escenarios a los que se aplican las funciones objetivo implementadas en el capítulo anterior a través de la herramienta desarrollada (capítulo 4). Los resultados de este análisis se muestran en el capítulo 5.

Por último, en el capítulo 6 se reflejan las conclusiones de los resultados obtenidos en el capítulo anterior así como las futuras líneas de investigación de este proyecto.

2. LA OPERATIVA DE DISTRIBUCIÓN DE MERCANCÍAS Y EL VEHÍCULO ELÉCTRICO

2.1 LA LOGÍSTICA URBANA DE DISTRIBUCIÓN DE MERCANCÍAS E IMPORTANCIA DEL VEHÍCULO ELÉCTRICO

Además del estudio matemático y científico del problema del enrutamiento expuesto en el estado del arte, el problema de la logística urbana ha sido abordado durante muchos años en numerosos experimentos y demostraciones prácticas. Algunos ejemplos son BESTUFS [23] (que propone una guía de buenas prácticas y de éxito en logística urbana) o CIVITAS [24] (proyecto de investigación europeo que propone medidas innovadoras para mejorar la movilidad sostenible). Estas líneas siguen abiertas añadiéndose otras investigaciones más futuristas como el “tranvía de mercancías” [25] o las redes urbanas de distribución subterráneas [26]. La principal barrera que impiden que estas alternativas alcancen el éxito es que tanto los operadores logísticos como usuarios consideran que a pesar del coste superior no ofrecen valor añadido desde un punto de vista comercial.

Por otro lado la sostenibilidad en el sector de la logística urbana es indispensable ya que la actividad económica de un país depende en gran parte de que los sistemas logísticos funcionen de forma correcta para poder suministrar materias primas a las industrias, movilizar los productos a lo largo de la cadena de suministro y poder finalmente entregar el producto final al cliente. Todo el entresijo logístico involucra muchas variables y actividades de lo cual, la más visible y nociva es el uso extensivo del transporte de mercancías [27].

Entre los problemas medioambientales y de sostenibilidad más graves identificados por la UE están las emisiones de gases de efecto invernadero. Es por ello que el acuerdo de París de las Naciones Unidas lanza medidas en esa dirección, marcando una reducción del 40% de las emisiones de CO₂ para el 2030 con respecto a los niveles de 1990 [28] [29]. Este acuerdo sustituye al protocolo de Kyoto [30] e indica que debe de acelerarse el nivel de reducción de emisiones para alcanzar los objetivos.

Estos objetivos no serán fáciles de cumplir teniendo en cuenta que el volumen de transporte de mercancías está aumentando de forma firme en los últimos años. Esta tendencia al alza se empezó a observar en España en 2015 [31]. Cabe destacar la importancia del transporte por carretera sobre todo en cortas distancias. Es por ello que para alcanzar estos objetivos hay que tomar medidas que pasan por el uso de las energías renovables y reducir el uso de combustibles fósiles [32]. Es en este entorno en el que este proyecto toma contexto, proponiendo una herramienta que permite la evaluación de la mejor alternativa de reparto en una flota determinada de vehículos eléctricos.

Como comentado en el primer capítulo, son varios los enfoques que se han estudiado para abordar el problema del ruteado de vehículos (TSP, CPP y VRP). En el presente proyecto el enfoque abordado es el VRP estudiando, analizando y proponiendo unas funciones objetivo que ayuden a la elección de la ruta más óptima, partiendo de una flota de vehículos 100% eléctrica.

2.2 EL VEHÍCULO ELÉCTRICO

El uso del vehículo eléctrico empieza a ser cada vez más común en Europa, encabezando Noruega esta lista (en 2017 los coches eléctricos en Noruega tenían una cuota de mercado del 39.2%, la más alta a nivel mundial) [33]

Cada vez son más los vehículos que incorporan sistemas de ahorro de energía o que utilizan la energía eléctrica para propulsarse. Según la tecnología empleada se clasifican en:

- **Micro Híbridos**, son los vehículos convencionales que incorporan tecnología para la recuperación de energía como el sistema Start&Stop o recuperación de energía en las frenadas.
- **Coche híbrido eléctrico (Hybrid Electric Vehicle, HEV)**, son los conocidos como “híbridos convencionales” o “no enchufables” y combinan un motor térmico y uno o varios motores eléctricos pequeños. Están dotados de un pequeño paquete de baterías que se recargan gracias al motor térmico.
- **Coche híbrido eléctrico enchufable (Plug-in Hybrid Electric Vehicle, PHEV)**, es el siguiente paso al HEV ya que con la misma disposición de potencia incorpora una toma de corriente que permite cargar las baterías conectándose a la red.
- **Coche eléctrico de pila de combustible (Fuel Cell Electric Vehicle, FCEV)**, son vehículos cuyo principio de funcionamiento es la pila de hidrógeno, es decir, se obtiene la energía eléctrica que alimenta los motores a través de la oxidación del hidrógeno.
- **Coche eléctrico de Batería o cero emisiones (Battery Electric Vehicle, BEV/ZO)**, es el coche puramente eléctrico que cuenta con uno o varios motores eléctricos que se alimentan a través de unas baterías que previamente se cargan conectándose a la red eléctrica. Esta tecnología es la implementada en los coches diseñados 100% eléctricos para el presente proyecto

En el mercado español existen distintos vehículos eléctricos de diversas características. Todas las empresas automovilísticas han desarrollado o están desarrollando vehículos 100% eléctricos (Nissan LEAF, BMW i3/i3 rex/i8, Kia Soul, Renault ZOE,...). Además, existen en el mercado unos 4 modelos englobados en la categoría de furgonetas 100% eléctricos como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Furgonetas 100% eléctricas disponibles en el mercado español actual

	CITROËN	NISSAN	PEUGEOT	RENAULT
MODELO	BERLINGO ELECTRIC	e-NV200	PARTNER ELECTRIC	KANGOO ZE
AUTONOMÍA [km]	177	167	170	270
ACELERACIÓN 0-100 km/h [s]	19.4	14	18.7	20.3
BATERÍA TIPO	Litio	Iones Litio	Doble Pack Iones Litio	Iones Litio
BATERIA [kWh]	22.5	24	22.5	33
POTENCIA [kW]	67	80	49	43.86
PESO [Kg]	1605	1641	1530	1426
CARGA MÁXIMA AUTORIZADA [Kg]	2225	2220	2215	2126
LARGO/ANCHO/ALTO [mm]	4380/1810/1862	4560/1755/1858	4380/1810/1801	4666/1829/1836
PRECIO [€]	31116	28619	28000	26932

Como se ha comentado, los gases emitidos por la utilización de combustibles fósiles son los principales causantes de las emisiones de CO₂, lo que provoca el cambio climático. Como se

detalla a continuación, los vehículos eléctricos presentan una serie de ventajas sobre el vehículo convencional:

- Mayor eficiencia: los motores eléctricos tienen una mayor eficiencia (entorno al 90%) que los motores térmicos (alrededor del 30%). Esto se traduce en un mayor aprovechamiento de la energía y por ende una menor emisión de contaminantes a la atmósfera. Además el vehículo eléctrico permite recuperar una pequeña cantidad de energía mediante mecanismos sencillos como el freno regenerativo (ver apartado 3.1.3).
- Reducción de la contaminación atmosférica: si bien es cierto que la producción de electricidad también emite gases contaminantes como el CO₂, esta electricidad se obtiene de diferentes fuentes, no todas tan contaminantes como los combustibles fósiles. Por ejemplo, la energía renovable y nuclear (60-65% de la producción eléctrica mensual desde marzo 2018) [34]. Además como comentado los motores eléctricos son mucho más eficientes que los motores térmicos.
- Reducción de la contaminación acústica: la principal fuente de contaminación acústica en el entorno urbano es la circulación de vehículos. Con el uso de los vehículos eléctricos este ruido se ve reducido sobre todo en los semáforos y arrancadas. A pesar de ello no se elimina por completo esta contaminación ya que como concluye el Dr. Robert Barti [35], un alto porcentaje de la contaminación acústica proviene de la rodadura de los neumáticos.
- Menor coste en mantenimiento: el motor eléctrico es muy compacto y con pocos componentes que puedan fallar a diferencia de un motor térmico. Esto hace del vehículo eléctrico una inversión fiable.

Pero al igual que el vehículo convencional, el vehículo eléctrico también tiene sus desventajas como se detalla a continuación:

- Menor autonomía: es uno de los principales puntos de mejora de este tipo de vehículos ya que suelen contar con una autonomía que escasamente llega a los 200 km en los mejores casos. Este problema está muy presente en este proyecto siendo una de las restricciones que más afectan en la distribución final.
- Puntos de recarga escasos: es una de las principales barreras a la hora de integrar el coche eléctrico en nuestras vidas. En España contamos con 3800 puntos de recarga [36] mientras que en Noruega se disponen de más de 11000 puntos de recarga públicos [37].
- Tiempo de recarga elevado: el tiempo de recarga de un vehículo eléctrico es muy superior al de un vehículo convencional.
- Inversión elevada a la hora de comprar un vehículo eléctrico: la compra de un EV supone una inversión más elevada que la compra de un vehículo normal. En el caso de Noruega, el gobierno invierte en numerosas ayudas y dota de numerosas ventajas a los usuarios que adquieran un vehículo de estas características (por ejemplo, en la compra de un vehículo TESLA el usuario tan solo pagaría un 50% del vehículo [38]).
- Pocos talleres especializados: el motor de un EV es mucho más compacto y fiable que el de un coche convencional pero a la hora de arreglar un posible fallo los talleres especializados son pocos por lo que tiene una repercusión directa en el precio de la reparación.

3. MATERIAL Y MÉTODO

3.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Este proyecto aborda el VRP en un entorno definido en el cual se tiene que repartir una cantidad determinada de mercancía (4000 kg de producto) a cada uno de los 20 puntos que forma el escenario en palés de 200 kg. Con objeto de acotar la dimensión del problema, se parte de la premisa de que los trabajadores son asalariados que forman parte de la empresa y que los vehículos utilizados están en propiedad (2 tipos de vehículos distintos, 5 vehículos grandes (VG) y 5 vehículos pequeños (VP)).

Como comentado el objetivo principal del trabajo consiste en determinar la flota y distribución óptima en una operativa de distribución de mercancías de última milla a través de unas funciones definidas para tal fin. Para ello se tiene cuenta toda una serie de variables y características particulares para este tipo de distribución que se definirán a lo largo de este apartado. Las funciones objetivo definidas son funciones de coste de distribución de mercancías en entornos urbanos en las cuáles se tendrá en cuenta una serie de variables. Estas funciones objetivo serán calculadas de forma automática por la herramienta desarrollada al introducir las distribuciones más óptimas en distancia, calculadas por el VRP Solver desarrollado por G.Erdogan. Gracias a esta herramienta desarrollada y a las funciones objetivo definidas se analizarán dos escenarios que se definirán en profundidad en el capítulo 4.

Para abordar el problema y poder llegar a conclusiones acerca de los resultados es necesario acotar la magnitud del problema ya que como comentado en la introducción, las variables a tener en cuenta son tantas que si se quisiera abordar todas de forma simultánea sería imposible llegar a conclusión alguna. Así pues las restricciones tenidas en cuenta a lo largo del proyecto (salvo en análisis puntuales si así es indicado) son las siguientes:

- La flota de vehículos es propia y la plantilla de trabajadores fija.
- La flota es fija y está formada por dos tipos de vehículos de distintas características en cuanto a su capacidad de carga, peso, autonomía,... En total son 5 VP y 5 VG (ver apartado 3.1.1).
- El VP puede transportar carga para 4 puntos de reparto y el VG 8. Es decir, en este caso de estudio el límite de material a transportar es por volumen y no por peso.
- Cada punto a abastecer precisa de una cantidad de mercancía igual a 200 kg. Esta cantidad de material es suministrada por un único vehículo en una sola vez.
- Ningún vehículo pasa dos veces por el mismo punto², es decir, cada camión lleva la cantidad de material justa para repartir a cada punto de reparto.
- Las distancias entre puntos considerada es la distancia euclídea, es decir, no se tiene en cuenta el recorrido real sino la distancia ordinaria. Con el fin de ajustar a la realidad el escenario planteado se definirá un factor de mayoración (factor "k").
- Las ventanas temporales no han sido tenidas en cuenta en el presente proyecto.
- Se calculará la velocidad crucero para cada uno de los escenarios.
- El punto de partida y de retorno de todos los vehículos en cada escenario es único.

² Se puede dar la excepción de que el camino más corto para llegar a otro punto sea pasando por un punto ya abastecido pero en ningún caso descargará mercancía en un punto ya abastecido por otro vehículo

3.1.1 VEHÍCULOS

La flota de vehículos de la cual se dispone y que será tomada en cuenta en todos los cálculos y análisis realizados en capítulos posteriores está formada por 2 tipos de vehículos, a distinguir entre:

- Vehículo pequeño (VP). Se disponen de 5 vehículos pequeños que tienen las siguientes características:
 - Capacidad, en volumen, para distribuir mercancía en 4 destinos
 - Autonomía de 200 km
 - Velocidad máxima 123 km/h
 - MMA 2250 kg

Como se detalla en el Anexo 1, con ayuda del software “Automóviles eléctricos v1.0” desarrollado por el Departamento de Ingeniería Mecánica Grupo I+D de Transportes de la Universidad de Zaragoza se calculará el peso de la batería y la capacidad de las mismas. Para ello, junto con las características comentadas, se detallan características acerca del vehículo como sus dimensiones, el peso de la estructura, tipo de tracción, potencia del motor, coeficiente aerodinámico, curva del motor,.. Todos estos detalles están reflejados en el anexo anteriormente comentado. Los datos obtenidos más relevantes son:

- Carga máxima 914.55 kg
 - POM³: 1335.45 kg
 - Potencia del motor: 128.97 CV
 - Capacidad de la batería: 22.18 kWh
 - Peso batería⁴: 160.45
- Vehículo grande (VG). Al igual que del vehículo pequeño, se disponen de 5 unidades. Las características de este segundo tipo de vehículo son las siguientes:
 - Capacidad, en volumen, para distribuir mercancía en 8 destinos
 - Autonomía de 150 Km
 - Velocidad máxima 123 km/h
 - MMA 5200 kg

Con ayuda del software comentado y como se detalla en el Anexo 1, se obtienen los siguientes datos:

- Carga máxima 2934.69 kg
 - POM: 2265.31 kg
 - Potencia del motor: 159.95 CV
 - Capacidad de la batería: 39.24 kWh
 - Peso batería: 290.31 kg

³ Peso en orden de marcha o TARA, se define como el peso del vehículo sin carga ni pasajeros, en condiciones de marcha con accesorios y depósitos de fluidos completos

⁴ El dimensionamiento de las baterías se ha realizado suponiendo una inclinación del 0% y una velocidad comercial de 50 km/h.

3.1.2 CONSUMO ESPECÍFICO DE LOS VEHÍCULOS

El consumo de un vehículo depende de numerosos factores entre ellos, el peso del vehículo, la potencia del motor, el combustible utilizado, el coeficiente aerodinámico, la velocidad y las condiciones externas (terreno sobre el que circula, clima, pendiente,...). De todos estos factores, los más relevantes e influyentes a lo largo del recorrido son el peso y la velocidad. Por un lado el peso del vehículo varía en función de los paquetes que transporta, por ello se define una tabla para cada vehículo en la que se tienen en cuenta todas las posibles cargas en función de las paradas que realiza. Esta tabla es única para cada velocidad crucero del vehículo, que viene definida por el escenario. Es por ello que para cada escenario los valores de la tabla varían (ver capítulo 4).

Como se comentará en el apartado 3.3, la herramienta Excel desarrollada en el presente proyecto lee de forma automática cada ruta del vehículo y utiliza el consumo adecuado en cada tramo de la ruta dependiendo del tipo de vehículo y número de paradas (el consumo cambia conforme el camión va repartiendo ya que el peso del vehículo disminuye).

3.1.3 FRENO REGENERATIVO

El freno regenerativo es un mecanismo de recuperación de energía del que disponen los vehículos eléctricos que permiten transformar la energía cinética en energía eléctrica que recargan las baterías del vehículo. Para que esta recuperación de energía sea efectiva, el freno motor debe actuar libremente y ser este el que detenga el vehículo, no el freno mecánico.

Este tipo de frenados es muy efectivo y puede recuperar hasta el 12% de energía [39] en trenes eléctricos, ya que realizan frenadas progresivas y prolongadas en el tiempo (la energía recuperada no va a las baterías sino al suministro eléctrico).

En este proyecto se ha tenido en cuenta el efecto del freno como la recuperación del 1% de la energía total consumida. Este valor es tan bajo debido a que las condiciones de alta efectividad en la recuperación de energía no se cumplen en el uso de vehículos de peso moderado en entornos urbanos.

3.1.4 VELOCIDAD CRUCERO DE LOS VEHÍCULOS

A la hora de calcular el tiempo de distribución de cada vehículo es importante definir lo que se conoce como velocidad crucero del vehículo. Este parámetro se define como la velocidad media a lo largo de todo el trayecto. Así pues, se tienen en cuenta factores como:

- Las paradas en los semáforos y el tráfico
- El plano de la ciudad (diseño hipodámico, lineal, radioconcéntrico o irregular)
- Las calles de velocidad reducida o entornos escolares
- Los tramos suburbanos

No se considera en el cálculo de la velocidad crucero los tiempos de descarga de material. Este factor es tenido en cuenta de forma separada en las fórmulas objetivo que se detallarán más adelante en este capítulo.

El valor de la velocidad crucero dependerá del escenario que se estudie, ya que como comentado, esta velocidad depende de numerosos factores únicos para cada localización geográfica. Se define como se detalla a continuación:

$$V_{VP} = V_{VG} = \frac{\sum_n^1 \frac{\text{Dist_REAL}_n}{\text{Tiempo_REAL}_n}}{n} \quad (1)$$

Siendo “n” el número de tramos que se han tenido en cuenta para el cálculo de la velocidad crucero.

El valor obtenido será empleado en todos los cálculos del escenario al que aplica, se trata de un valor medio. Para el cálculo de este valor se tendrán en cuenta 10 tramos de distintas longitudes.

3.1.5 FACTOR K

Para el cálculo de la distribución capilar óptima se tienen en cuenta las distancias euclídeas entre puntos. La distancia que realmente recorre el vehículo siempre será mayor que la distancia euclídea⁵ por lo que estas distancias se multiplican por un coeficiente de mayoración definido como factor “k”. Este factor dependerá al igual que la velocidad crucero de las características del escenario estudiado.

$$k = \frac{\sum_n^1 \frac{\text{Dist_REAL}_n}{\text{Dist_EUCLÍDEA}_n}}{n} \quad (2)$$

Siendo “n” el número de tramos considerado en el cálculo. La distancia euclídea se calcula mediante las coordenadas UTM y la distancia real con la ayuda de “Google Maps”.

3.1.6 TIEMPO DE DESCARGA DEL MATERIAL

En los análisis que se van a llevar a cabo se define un tiempo de descarga del material por parada. Este tiempo engloba el tiempo medio que el repartidor emplea para descargar la mercancía en los distintos puntos.

Este tiempo se considera el mismo tanto para el vehículo pequeño como para el vehículo grande y se ha tomado el valor de 10 minutos.

3.1.7 ESCENARIOS

Se han planteado dos escenarios de diferentes características. Por un lado se ha propuesto una logística de distribución en una ciudad de un tamaño pequeño/mediano en cuanto a extensión, Zaragoza. Por otro lado, se ha estudiado un segundo escenario de mayor superficie, Berlín.

Las características de cada escenario y todas sus variables así como la distribución de los puntos de reparto serán detalladas en el capítulo 4. Para cada escenario se plantearán 2 variantes, en una de ellas el almacén desde el que sale el vehículo se sitúa en un punto céntrico y en otra el punto de partida y llegada se encuentra en una ubicación del extrarradio de la ciudad.

⁵ A excepción de que la distancia real sea igual que la distancia euclídea

3.1.8 COSTE DEL CONSUMO ELÉCTRICO

A la hora de calcular el precio de la electricidad se van a tener en cuenta dos planteamientos distintos. El primero de ellos es un planteamiento pesimista en el cual se dimensiona la instalación para poder cargar todos los vehículos a la vez. El segundo de los planteamientos es un planteamiento más realista en el cual la potencia contratada es el 50% de la del planteamiento pesimista (la posibilidad de que surja la necesidad de cargar todos los vehículos a la vez es remota y a la hora de contratar una tarifa de luz, con el fin de ahorrar costes, en un entorno industrial, esto es tenido en cuenta)

Para calcular la potencia a contratar se va a suponer que los vehículos disponen del conector SAE J17772. En el escenario pesimista, la instalación es calculada para que se pueda recargar de forma simultánea toda la flota (5 vehículos pequeños y 5 grandes) a una potencia de 6.6kw [40], por lo que la potencia necesaria para cargar la flota es de 66kw. La potencia contratada será de 70kW en el escenario pesimista mientras que en el escenario realista será de 35kW

Se ha supuesto que, de media, el 50% de la flota se recarga una vez al día por lo que la energía consumida total a lo largo de un año (aproximadamente de 250 días laborales) es:

$$E_{\text{consumida_anual}} = (5 * 35.71 + 5 * 52.78) * 250 * 0.5 = 55306.25 \text{ kwh} \quad (3)$$

Para calcular el precio del kWh se supone la utilización de la tarifa 3.0a ya que se trata de un suministro con una potencia contratada superior a 15kW tanto en el escenario pesimista como realista [41] [42].

Al tratarse de una tarifa con discriminación horaria, existen tres tarifas distintas (valle, llano y punta) con dos peajes, una en término de potencia y otra en término de consumo.



Figura 1. Periodos según horario [Fuente: comparadorluz.com]

Tabla 2. Tarifas 3.0a según periodo [Fuente: Iberdrola (2018)]

Periodo	Peaje termino potencia tarifa 3.0a	Peaje término consumo tarifa 3.0a
Punta	42.203054 €/kW año	0.110571 €/kWh
Llano	22.601311 €/kW año	0.092887 €/kWh
Valle	18.211416 €/kW año	0.065842 €/kWh

Habitualmente los vehículos serán cargados por la noche (tarifa valle), por ello se estima que el 70% de la energía consumida será en periodo valle, 15% en periodo llano y 15% en periodo punta. A continuación se detallará el precio por kWh suponiendo un escenario pesimista y realista.

3.1.8.1 ESCENARIO PESIMISTA

Por un lado se calcula lo que supone por kWh el término de potencia fija (gracias a la estimación del consumo que se ha realizado anteriormente)

$$\text{Peaje}_{\text{pot}} = \frac{(42.203054 + 22.601311 + 18.211416) \text{ €/kW año} * 70 \text{ kW}}{250 \text{ día/año}} = 23.24 \text{ €/día}$$

$$\text{Peaje}_{\text{pot}^6} = \frac{23.24 \text{ €/día}}{221.25 \text{ kWh/día}} = 0.105039 \text{ €/kWh}$$

De la misma forma también se tiene en cuenta el alquiler del contador. Este precio será el fijado en cada momento por el Ministerio de Energía, Turismo y Agenda Digital para la tarifa de acceso correspondiente y que cobre la Empresa Distribuidora [43]:

$$\text{Alquiler}_{\text{contador}} = \frac{0.091726 \text{ €/día}}{221.25 \text{ kWh/día}} = 0.00041458 \text{ €/kWh}$$

El término de consumo depende directamente de la energía consumida por lo que su cálculo es el siguiente:

$$\text{Peaje}_{\text{con}} = 0.7 * 0.065842 + 0.15 * 0.110571 + 0.15 * 0.092887 = 0.0766081 \text{ €/kWh}$$

En total, el precio libre de impuestos es:

$$\text{Precio}_{\text{electricidad(Sin.Imp)}} = (0.105039 + 0.00041458 + 0.0766081) = 0.182061 \text{ €/kWh}$$

A esta tarifa calculada hay que sumarle el impuesto eléctrico, que es 5,11269632% y el IVA.

$$\text{PrecioPES}_{\text{elect}} = 0.182061 \text{ €/kWh} * (1 + 0.0511269632 + 0.21) = \mathbf{0.2296029 \text{ €/kWh}} \quad (4)$$

3.1.8.2 ESCENARIO REALISTA

De la misma forma que en el escenario pesimista, se calcula el término de potencia fija y se estima, gracias a la energía consumida, la repercusión económica por kWh:

$$\text{Peaje}_{\text{pot}} = \frac{(42.203054 + 22.601311 + 18.211416) \text{ €/kW año} * 35 \text{ kW}}{250 \text{ día/año}} = 11.62 \text{ €/día}$$

$$\text{Peaje}_{\text{pot}^7} = \frac{11.62 \text{ €/día}}{221.25 \text{ kWh/día}} = 0.05252 \text{ €/kWh}$$

De la misma forma también se tiene en cuenta el alquiler del contador y el término de consumo:

⁶ A pesar de que el término de potencia no depende de la energía (kWh) sino de la potencia (kW), con la estimación de energía consumida se va a calcular el precio por kWh para poder reflejar este término en el parámetro del coste de la electricidad

$$\text{Alquiler}_{\text{contador}} = \frac{0.091726 \text{ €/día}}{221.25 \text{ kWh/día}} = 0.00041458 \text{ €/kWh}$$

$$\text{Peaje}_{\text{con}} = 0.7 * 0.065842 + 0.15 * 0.110571 + 0.15 * 0.092887 = 0.0766081 \text{ €/kWh}$$

En total, el precio libre de impuestos es:

$$\text{Precio}_{\text{electricidad(Sin.Imp)}} = (0.05252 + 0.00041458 + 0.0766081) = 0.12954 \text{ €/kWh}$$

Finalmente, tras tener en cuenta los distintos impuestos, el coste de la electricidad teniendo en cuenta el escenario realista es:

$$\text{PrecioREA}_{\text{elect}} = 0.12954 \text{ €/kWh} * (1 + 0.0511269632 + 0.21) = \mathbf{0.16337 \text{ €/kWh}} \quad (5)$$

3.1.9 COSTE PERSONAL

Otro de los parámetros a tener en cuenta es el coste horario del trabajador. En este parámetro se refleja el impacto económico expresado en forma de tasa horaria que tiene cada trabajador para el empresario.

El sueldo medio bruto percibido por un trabajador que desarrolla una actividad de estas características es aproximadamente 1150€ [44]. La empresa cotiza un 23.6% [45] por cada trabajador por lo que el impacto económico por trabajador para la empresa es 1421.40€ mensuales.

Teniendo en cuenta 20 días laborales al mes y 8 horas diarias, el coste horario por trabajador es 8.88€/h.

3.2 FUNCIONES A OPTIMIZAR

La forma de cuantificar el impacto económico de la distribución, de comparar y evaluar las distintas distribuciones capilares es a través de las funciones objetivo de las cuáles se buscará su optimización (minimización). Las funciones objetivo reflejan el impacto económico a minimizar desde dos puntos de vista distintos. Por un lado se considera únicamente el consumo que tienen el total de los vehículos según la distribución (f1), es decir, el coste humano es nulo. Por otro se tiene en cuenta tanto el consumo como el coste horario del personal (f2), que a día de hoy es la función más realista.

3.2.1 FUNCIÓN OBJETIVO DE CONSUMO (f1)

En esta función se refleja el impacto económico debido exclusivamente al consumo energético de los vehículos. Esta función mostrará la relevancia que tiene el consumo sobre el coste total y si en un escenario futuro y posible, con la automatización de los vehículos, influiría en la estrategia de distribución planteada.

Al disponer de dos vehículos de diferentes características el consumo dependerá del tipo de vehículo utilizado, de la carga transportada y de la velocidad del mismo. Así pues, la forma de cuantificar el consumo de energía es por tramos, es decir, se calcula el consumo por tramos a

una velocidad determinada. La suma del consumo de los tramos recorridos por un vehículo conformará su consumo. A su vez la suma de los consumos de los distintos vehículos que participan en una distribución formará la función objetivo que se refleja a continuación:

$$f_1 = f_{Consumo} = [(C_{espV1P1} * X_{V1P1} * P_{V1P1} + \dots + C_{espV1Pn} * X_{V1Pn} * P_{V1Pn}) + \dots + (C_{espVmP1} * X_{VmP1} * P_{VmP1} + \dots + C_{espVmPn} * X_{VmPn} * P_{VmPn})] * Coste_{elec} \quad (6)$$

$C_{espVmPn}[\frac{kWh}{t*km}]$ Consumo específico⁸ del vehículo m entre la parada “n-1” y “n”

$X_{VmPn}[km]$ Distancia recorrida por el vehículo m entre la parada “n-1” y “n”

$P_{VmPn}[t]$ Peso del vehículo m entre la parada “n-1” y “n”

$Coste_{elec}[\frac{\epsilon}{kWh}]$ Coste de la electricidad

Siendo “n” el número de paradas de cada uno de los vehículos y “m” el número de vehículos (distinguiendo entre pequeños y grandes), es decir, cada una de las rutas.

3.2.2 FUNCIÓN OBJETIVO OPERATIVA (f2)

En el panorama actual, la función objetivo de consumo definida como f1 es útil a la hora de analizar y estudiar cuál es la mejor ruta desde el punto de vista del consumo energético pero no refleja de manera fiel la ruta más viable desde una perspectiva económica. Esto se debe a que en la operativa de distribución, el factor humano es, al menos en la actualidad, imprescindible en este tipo de operativas.

Por ello se ha definido una segunda función objetivo que integra el factor humano (función coste horario) donde se ha tenido en cuenta la operativa del vehículo por completo. Se ha definido este factor de forma horaria ya que en este tipo de operativas, el factor de recurso humano se precisa de esta forma

$$f_2 = f_{CosteHorario} + f_{Consumo} \quad (7)$$

Esta nueva parte de la función, engloba variables como el tiempo entre paradas, el número de paradas, la velocidad cruceo del vehículo o el coste que tiene el trabajador por la utilización del vehículo en el que se incluye el salario del trabajador, seguridad social,...

En resumen, la función objetivo operativa (f2) se define como se indica a continuación:

⁸ Como se ha comentado, el consumo específico depende del estado de carga del vehículo.

$$f_2 = \left(\frac{X_{VP1}}{V_{VP}} + \dots + \frac{X_{VPm}}{V_{VP}} + N_{paradaVP} * T_{paradaVP} \right) * \frac{CosteVP_{Horario}}{Persona} + \left(\frac{X_{VG1}}{V_{VG}} + \dots + \frac{X_{VGm}}{V_{VG}} + N_{paradaVG} * T_{paradaVG} \right) * \frac{CosteVG_{Horario}}{Persona} + f_{Consumo} \quad (8)$$

$X_{VPn} [km]$	Distancia recorrida por cada vehículo pequeño
$X_{VGn} [km]$	Distancia recorrida por cada vehículo grande
$V_{VP} [km]$	Velocidad crucero del vehículo pequeño
$V_{VG} [\frac{km}{h}]$	Velocidad crucero del vehículo grande
$N_{paradaVP}$	Número de paradas totales de los vehículos pequeños
$N_{paradaVG}$	Número de paradas totales de los vehículos grandes
$T_{paradaVP} [h]$	Tiempo de parada medio del vehículo pequeño
$T_{paradaVG} [h]$	Tiempo de parada medio del vehículo grande
$CosteVP_{\frac{Horario}{Persona}} [\frac{€}{h}]$	Coste horario de personal de un vehículo pequeño
$CosteVG_{\frac{Horario}{Persona}} [\frac{€}{h}]$	Coste horario de personal de un vehículo grande

3.3 HERRAMIENTA DESARROLLADA Y MÉTODO DE CÁLCULO

La forma de estudiar y analizar cada uno de los escenarios planteados es a través de un archivo Excel desarrollado para tal fin. Este archivo cuenta con las siguientes partes diferenciadas:

- Resultados: en esta hoja se muestran los resultados obtenidos.
- Distribuciones óptimas: esta parte de la herramienta está formada por un total de 10 hojas en las cuáles se plantean las distribuciones óptimas para distintas combinatorias de vehículos. Se calculan todas las variables que luego aparecen en la hoja de resumen.
- Consumos: se detallan los consumos de ambos vehículos según el número de paradas que realiza y de la velocidad crucero del escenario estudiado.
- Coste de la electricidad: se detalla el cálculo del coste por kWh de la electricidad tal como se ha detallado en el apartado 3.1.8.
- Coste Personal: cálculo del coste horario del personal (detalle en apartado 3.1.9).

Cada escenario se trabaja en un archivo Excel distinto con el fin de poder comparar de forma simultánea los escenarios entre ellos.

La única información que hay que introducir en la hoja de cálculo además de las distintas características del vehículo comentadas anteriormente es la ruta óptima en función de la distancia para cada una de las posibles distribuciones. La distribución óptima se ha obtenido a través de un software desarrollado por G. Erdogan. Esta macro permite obtener la distribución óptima para una flota determinada de vehículos (en el caso del presente proyecto “VP” y “VG” cada uno con su autonomía y capacidad), en una nube determinada de puntos a los que

distribuir mercancía y uno o varios puntos de partida y regreso (en este caso un único punto). En el Anexo 2 se ha detallado el uso de esta herramienta.

La herramienta desarrollada presenta las siguientes limitaciones:

- Capacidad de procesamiento de hasta 10 rutas en las que estén implicados hasta 10 vehículos.
- La flota de vehículos puede estar formada hasta por 2 tipos de vehículos diferentes
- Uno de los vehículos puede tener capacidad para distribución de mercancía a 8 puntos y otro a 4 puntos.
- Permite realizar estudio de sensibilidad acerca de los siguientes parámetros: precio electricidad, salario conductor de VG y VP, velocidad crucero, tiempo de parada de VG y VP, distancia entre puntos de reparto, parámetro k e influencia del freno regenerativo.

Los parámetros de entrada son como comentado las rutas óptimas en función de la distancia y los distintas variables que se han definido en el capítulo 3. Por otro lado, los parámetros de salida es una tabla como las mostradas en el capítulo 5 en el cual se detalla para cada distribución sus funciones objetivo así como la distancia recorrida por los vehículos (VP y VG), el consumo de energía, el número de paradas realizado por VP y VG, los vehículos implicados y el tiempo empleado.

3.3.1 RESULTADOS

Aquí se encuentra la tabla más importante formada por 10 filas (una por cada distribución) y una serie de columnas en la que se detallan las siguientes características:

- Vehículos pequeños y grandes empleados así como la suma total.
- Distancia recorrida por los vehículos pequeños y grandes así como la suma total.
- Número de paradas realizadas por los vehículos pequeños y grandes así como la suma total.
- Energía consumida por el total de los vehículos sin tener y teniendo en cuenta el efecto del freno regenerativo.
- Resultado de la aplicación de la función objetivo 1.
- Resultado de la aplicación de la función objetivo 2.

Esta tabla de resultados obtiene la información del resto de las hojas Excel de forma automática, lo que permitirá realizar un análisis intensivo de las funciones objetivo gracias a estudios de sensibilidad.

En esta hoja se dispone también de las distintas variables que se pueden variar, así como acceso directo a las distintas pestañas.

3.3.2 DISTRIBUCIONES ÓPTIMAS

Es imposible evaluar y aplicar las fórmulas objetivo desarrolladas a las casi infinitas distintas opciones de distribución que hay para un escenario y flota determinados. Es por ello que el primer paso sea buscar la distribución más óptima en función de la distancia para las distintas combinaciones de flota.

Aun así evaluar la distribución óptima en cuanto a distancia de las numerosas posibles combinaciones de flota es un proceso tedioso y que supondría transformar este archivo en una

herramienta poco útil. Al tener una flota de vehículos formada por 5 VP y 5 VG se calculan para cada escenario las siguientes 10 distribuciones: distribución formada por 1 VP y los mínimos VG posibles, 2 VP y los mínimos VG posibles,..., 1 VG y los mínimos VP posibles,..., 5 VG y los mínimos VP posibles. De esta forma nos aseguramos con tan solo 10 distribuciones, como máximo (siempre hay alguna distribución repetida), que entre ellas se obtenga la distribución más óptima en función de la distancia que es el factor más determinante a la hora de minimizar las funciones objetivo. Como comentado, estas distribuciones se han calculado con la macro desarrollada por G.Erdogan.

Cada una de estas distribuciones se trabaja en una hoja Excel por separado (10 hojas en total). Estas distribuciones se introducen en una tabla (celdas amarillas) como la que se muestra en la tabla 3. Automáticamente se rellenan las celdas moradas con la distancia relativa entre paradas (es calculada de manera automática una vez introducida la nube de puntos gracias a la lectura de datos en la matriz de distancias), así como el número de paradas, la distancia recorrida y la energía consumida.

Tabla 3. Ejemplo de tabla distribución de la herramienta desarrollada

SENTIDO A												DISTANCIA	Nº paradas	Consumo energía (KWh)	
VG	1	PTO	1	12	19	10	21	5	4	16	20	1	30.13	8	3.99
		DIST		3.66	2.77	2.20	6.89	3.25	3.12	2.84	1.97	3.44			
VP	1	PTO	1	8	18	14	9	1	1	1	1	1	21.34	4	1.47
		DIST		5.88	2.16	5.00	4.09	4.21	0.00	0.00	0.00	0.00			
VP	2	PTO	1	11	7	6	17	1	1	1	1	1	27.90	4	1.99
		DIST		11.34	4.37	3.37	4.03	4.79	0.00	0.00	0.00	0.00			
VP	3	PTO	1	2	13	15	3	1	1	1	1	1	25.34	4	1.74
		DIST		7.52	2.51	4.79	4.93	5.59	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0.00
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0.00
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0.00
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0.00
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0.00
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0.00
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0.00
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
TOTAL											104.72	20.00	9.19		

Para que esto sea posible previamente es importante interpretar de forma correcta la nube de puntos obtenida a través de mymaps.com [46]. Los diferentes escenarios son diseñados en esta página web que nos proporciona las coordenadas geográficas de los distintos puntos. Con el objeto de simplificar los cálculos a la hora de obtener la matriz de distancias (ver Anexo 3), estas coordenadas se transforma al sistema de coordenadas UTM⁹ a través de un conversor online [47].

Desde el punto de vista de la optimización de la distancia, teniendo en cuenta la restricción aplicada de que la distancia es euclídea, la ruta es igual de óptima si se empieza a recorrer en un sentido que si se hace en el contrario. Teniendo en cuenta los consumos no es indiferente, por ello para cada distribución se plantean ambas rutas y la que menor energía consume es tomada en cuenta en las funciones objetivo, todo ello realizado de forma automática.

Para tener en cuenta el efecto de la diferencia entre la distancia real recorrida por el vehículo y la distancia euclídea, se define el factor “k” por el cual se multiplicarán las distancias euclídeas

⁹ Este sistema desarrollado por el ejército de los EEUU en la década de 1940 aplica la cartografía de Mercator para transformar las coordenadas geográficas en coordenadas cartesianas, eso sí, dividiendo el mapa terrestre en una cuadrícula de 60 (husos) por 20 (bandas)

(véase apartado 3.1.5). Este factor se aplica previo al cálculo de la ruta óptima ya que en la optimización se tiene en cuenta la distancia máxima que puede recorrer cada tipo de vehículo.

Además nos proporciona un gráfico que muestra la distribución introducida para cada una de las opciones. Más información e imágenes de esta herramienta Excel pueden encontrarse en el Anexo 3

3.3.3 CONSUMO ESPECÍFICO DE LOS VEHÍCULOS

En esta hoja aparecen los consumos dependiendo del tipo de vehículo (VP o VG) y del número de paradas que ha realizado. Esta tabla alimenta las denominadas hojas de distribución de manera automática.

El consumo específico de los vehículos depende de numerosos parámetros como se ha comentado anteriormente, pero el parámetro que varía entre un escenario y otro es la velocidad crucero, que será determinante a la hora de calcular los diferentes consumos específicos.

3.3.4 COSTE DEL CONSUMO ELÉCTRICO

En esta hoja se determina el coste de la electricidad de la forma que ha sido detallada en el apartado 3.1.8. Se ha reflejado el coste de la electricidad por kWh tomando las aproximaciones especificadas en el apartado comentado.

3.3.5 COSTE PERSONAL

De la misma forma que con el coste de la electricidad en esta página se ha detallado el coste de personal horario. Para más información consultar el apartado 3.1.9.

4.1 INTRODUCCIÓN

Como comentado brevemente en el apartado anterior, se van a estudiar dos escenarios de características totalmente dispares de los cuáles se estudiarán y analizarán los resultados gracias a la herramienta desarrollada.

La principal diferencia entre ambos escenarios es el tamaño de la ciudad de estudio. Por un lado se va a simular una operación logística aplicando la herramienta en el entorno de Zaragoza, una ciudad de distancias pequeñas/medianas. Por otro lado se simulará una operación logística similar en el entorno de Berlín, una ciudad de mayores dimensiones que presenta una gran distancia entre puntos de reparto.

4.2 ESCENARIO A: ZARAGOZA

4.2.1 INTRODUCCIÓN

La ciudad de Zaragoza es una ciudad de una superficie media en un entorno nacional y pequeña si se compara con grandes ciudades como podrían ser Londres o Berlín. La ciudad se puede acotar aproximadamente en una cuadrícula de 12km x 8km como se observa en la figura 2.

Zaragoza es una ciudad con un desnivel medio no muy pronunciado, con un núcleo urbano peatonalizado y con numerosas calles de velocidad reducida. Cuenta con 2 circunvalaciones que descarga el tráfico urbano siendo una de ellas de alta velocidad (Z40) [48]. Todo esto influye en el cálculo de la velocidad crucero.



Figura 2. Mapa superficie Zaragoza [Fuente: mymaps.com]

4.2.2 ESTABLECIMIENTO DE PUNTOS DE REPARTO Y DE LA DEMANDA

El número de puntos que se van a abastecer son un total de 20 y van a ser estudiadas dos situaciones distintas, la primera suponiendo que el centro logístico/almacén del cuál parten y

vuelven los vehículos está situado en el centro de la ciudad (ESCENARIO A1) y la segunda, con los mismos puntos de reparto, pero en el cuál el centro logístico/almacén se encuentra a las afueras de la ciudad (ESCENARIO A2). En la figura 3 y 4 se pueden observar ambos escenarios.

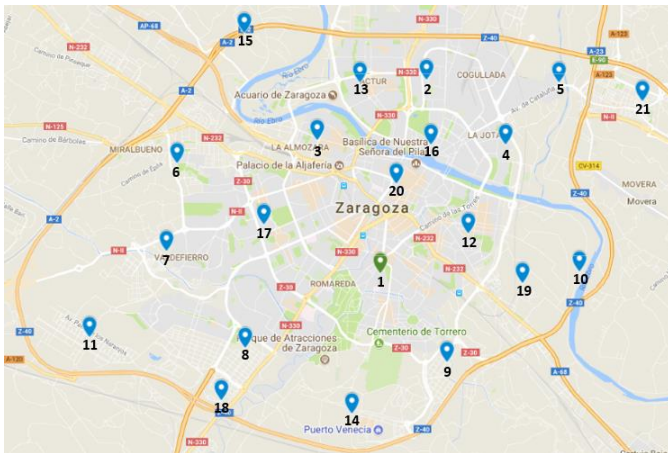


Figura 3. Distribución de puntos escenario A1

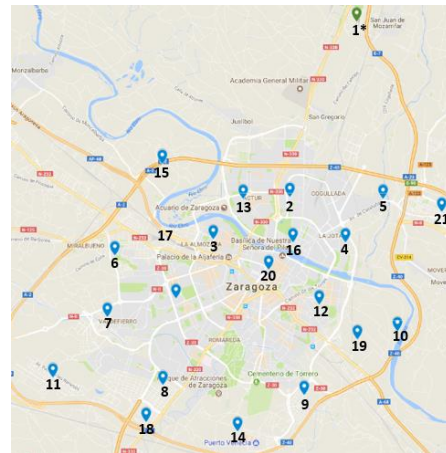


Figura 4. Distribución de puntos escenario A2

En la tabla 4 se muestran las coordenadas de los distintos puntos tanto para el escenario A1 como A2.

Tabla 4. Puntos de reparto para el escenario A (A1 y A2)

Punto	Coordenadas Geográficas		Coordenadas UTM		Punto	Coordenadas Geográficas		Coordenadas UTM	
	Latitud	Longitud	X [km]	Y [km]		Latitud	Longitud	X [km]	Y [km]
1 (A1)	41.63690	-0.88720	675.973	4611.619	11	41.62532	-0.95752	670.1463	4610.1922
1* (A2)	41.71665	-0.85322	678.584	4620.549	12	41.64405	-0.86603	677.7167	4612.4564
2	41.67175	-0.87615	676.798	4615.511	13	41.67137	-0.89212	675.4696	4615.4363
3	41.66098	-0.90242	674.640	4614.262	14	41.61159	-0.89401	675.4744	4608.7951
4	41.66008	-0.85710	678.416	4614.255	15	41.68034	-0.92010	673.1162	4616.3757
5	41.67137	-0.84423	679.456	4615.535	16	41.66009	-0.87512	676.9157	4614.2187
6	41.65675	-0.93624	671.836	4613.724	17	41.64572	-0.91529	673.6096	4612.5415
7	41.64084	-0.93898	671.650	4611.952	18	41.61403	-0.92559	672.8365	4609.0022
8	41.62339	-0.91993	673.283	4610.053	19	41.63520	-0.85298	678.8280	4611.5008
9	41.62083	-0.87118	677.351	4609.868	20	41.65303	-0.88336	676.2489	4613.4179
10	41.63725	-0.83925	679.966	4611.757	21	41.66803	-0.82406	681.1449	4615.2064

Como comentado anteriormente, la demanda de cada uno de los puntos de reparto de mercancía será 200kg

4.2.3 VELOCIDAD CRUCERO

Para determinar la velocidad crucero a la que circularán los vehículos (VP y VG) se ha utilizado la herramienta Google Maps que permite obtener la distancia y tiempo de circulación real entre dos puntos (lo que permite calcular la velocidad media real).

Con el objeto de que este dato sea lo más realista posible, esta velocidad media se calcula en un total de 10 recorridos de distintas longitudes. Como se detalla en la tabla 5, la velocidad crucero para el entorno de Zaragoza es de 30 km/h aproximadamente. Esta velocidad es de aplicación para la totalidad del escenario.

Tabla 5. Cálculo velocidad crucero Zaragoza

Pto Partida	Pto. Fin	Distancia Real [km]	Tiempo [min]	Velocidad Crucero [km/h]
20	12	4.2	14	18.00
3	14	12.2	21	34.86
17	5	8.0	19	25.26
1	8	4.2	10	25.20
1	2	5.4	15	21.60
7	19	17.9	16	67.13
20	16	4.2	11	22.91
2	9	7.2	14	30.86
13	2	2.0	6	20.00
2	17	5.8	15	23.20
6	21	13.9	20	41.70
				30.06

4.2.4 FACTOR K

El factor k tiene en cuenta la discrepancia existente entre la distancia euclídea y la distancia real. De esta forma se considera de forma aproximada la desviación entre ambos datos, obteniendo una solución más fiel a la realidad.

De la misma forma que para el cálculo de la velocidad crucero, se calcula la distancia real recorrida por el vehículo (con ayuda de Google Maps) y la distancia euclídea (por geometría). Se han tenido en cuenta un total de 10 recorridos de distintas longitudes.

El valor que se ha tenido en cuenta para los distintos cálculos será $k=1.9$. En la tabla 6 se muestran los datos que se han tenido en cuenta para el cálculo de esta constante empírica.

Tabla 6. Cálculo factor "k" Zaragoza

Pto. Partida	Pto. Fin	Distancia Real [km]	Distancia Euclídea [km]	k
20	12	4.2	1.8	2.33
3	14	12.2	5.5	2.22
17	5	8.0	6.6	1.21
1	8	4.2	3.1	1.35
1	2	5.4	4.0	1.35
7	19	17.9	7.2	2.49
20	16	4.2	1.0	4.20
2	9	7.2	5.7	1.26
13	2	2.0	1.3	1.54
2	17	5.8	4.4	1.32
6	21	13.9	9.4	1.48
				1.89

4.2.5 TABLAS DE CONSUMO

En la tabla 7 y 8 se refleja el consumo específico entre parada y parada¹⁰ en función del peso para una velocidad determinada ($v=30$ km/h). Estos datos se han calculado a través del software “Automóviles eléctricos v1.0”. En el caso del vehículo pequeño puede transportar material para repartir en 4 puntos (200kg para cada punto de reparto). Así pues, se considerarán los 5 distintos niveles de carga para saber el consumo específico.

Tabla 7. Consumos vehículo pequeño en función del número de paradas para $v=30$ km/h

VEHICULO PEQUEÑO						
Paradas						
1	Peso [t]	1.53545	1.33545	0	0	0
	Consumo [kWh/t km]	0.04057	0.04203	0	0	0
	Peso*Consumo [kWh/km]	0.0623	0.0561	0	0	0
2	Peso [t]	1.73545	1.53545	1.33545	0	0
	Consumo [kWh/t km]	0.03944	0.04057	0.04203	0	0
	Peso*Consumo [kWh/km]	0.0684	0.0623	0.0561	0	0
3	Peso [t]	1.93545	1.73545	1.53545	1.33545	0
	Consumo [kWh/t km]	0.03855	0.03944	0.04057	0.04203	0
	Peso*Consumo [kWh/km]	0.0746	0.0684	0.0623	0.0561	0
4	Peso [t]	2.13545	1.93545	1.73545	1.53545	1.33545
	Consumo [kWh/t km]	0.03783	0.03855	0.03944	0.04057	0.04203
	Peso*Consumo [kWh/km]	0.0808	0.0746	0.0684	0.0623	0.0561

En el caso del vehículo grande puede transportar mercancía para abastecer 8 puntos. De la misma forma que para el VP, en la tabla 8 se muestran los consumos.

Tabla 8. Consumos vehículo grande en función del número de paradas para $v=30$ km/h

VEHICULO GRANDE										
Paradas										
1	Peso [t]	2.46531	2.26531	0	0	0	0	0	0	0
	Consumo [kWh/t km]	0.04567	0.04698	0	0	0	0	0	0	0
	Peso*Consumo [kWh/km]	0.1126	0.1064	0	0	0	0	0	0	0
2	Peso [t]	2.66531	2.46531	2.26531	0	0	0	0	0	0
	Consumo [kWh/t km]	0.04456	0.04567	0.04698	0	0	0	0	0	0
	Peso*Consumo [kWh/km]	0.1188	0.1126	0.1064	0	0	0	0	0	0
3	Peso [t]	2.86531	2.66531	2.46531	2.26531	0	0	0	0	0
	Consumo [kWh/t km]	0.0436	0.04456	0.04567	0.04698	0	0	0	0	0
	Peso*Consumo [kWh/km]	0.1249	0.1188	0.1126	0.1064	0	0	0	0	0
4	Peso [t]	3.06531	2.86531	2.66531	2.46531	2.26531	0	0	0	0
	Consumo [kWh/t km]	0.04277	0.0436	0.04456	0.04567	0.04698	0	0	0	0
	Peso*Consumo [kWh/km]	0.1311	0.1249	0.1188	0.1126	0.1064	0	0	0	0
5	Peso [t]	3.26531	3.06531	2.86531	2.66531	2.46531	2.26531	0	0	0
	Consumo [kWh/t km]	0.04204	0.04277	0.0436	0.04456	0.04567	0.04698	0	0	0
	Peso*Consumo [kWh/km]	0.1373	0.1311	0.1249	0.1188	0.1126	0.1064	0	0	0
6	Peso [t]	3.46531	3.26531	3.06531	2.86531	2.66531	2.46531	2.26531	0	0
	Consumo [kWh/t km]	0.04139	0.04204	0.04277	0.0436	0.04456	0.04567	0.04698	0	0
	Peso*Consumo [kWh/km]	0.1434	0.1373	0.1311	0.1249	0.1188	0.1126	0.1064	0	0
7	Peso [t]	3.66531	3.46531	3.26531	3.06531	2.86531	2.66531	2.46531	2.26531	0
	Consumo [kWh/t km]	0.04081	0.04139	0.04204	0.04277	0.0436	0.04456	0.04567	0.04698	0
	Peso*Consumo [kWh/km]	0.1496	0.1434	0.1373	0.1311	0.1249	0.1188	0.1126	0.1064	0
8	Peso [t]	3.86531	3.66531	3.46531	3.26531	3.06531	2.86531	2.66531	2.46531	2.26531
	Consumo [kWh/t km]	0.0403	0.04081	0.04139	0.04204	0.04277	0.0436	0.04456	0.04567	0.04698
	Peso*Consumo [kWh/km]	0.1558	0.1496	0.1434	0.1373	0.1311	0.1249	0.1188	0.1126	0.1064

¹⁰ En esta tabla se incluye una fila del peso x consumo (kWh/km) ya que está integrada dentro de la Excel desarrollada. Es necesario para luego calcular el consumo de cada vehículo.

4.3 ESCENARIO B: BERLÍN

4.3.1 INTRODUCCIÓN

Berlín es una ciudad de una superficie aproximada de 40km x 40km (figura 5). Al tratarse de una ciudad de gran extensión las conexiones y el tráfico está organizado para tal fin. Es una ciudad que apuesta por el transporte público, prueba de ella son los dos anillos ferroviarios interior y exterior de 37 y 126 km de longitud respectivamente. Además la ciudad dispone de vías de alta velocidad que nacen del interior de la ciudad como se puede ver en la figura 6 [49].

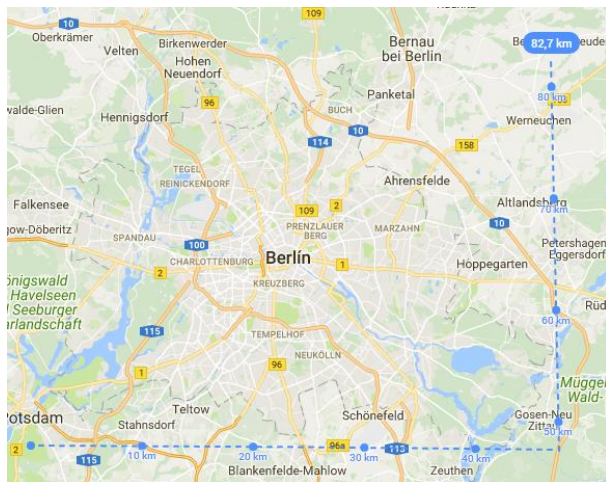


Figura 5. Mapa superficie Berlín [Fuente: mymaps.com]

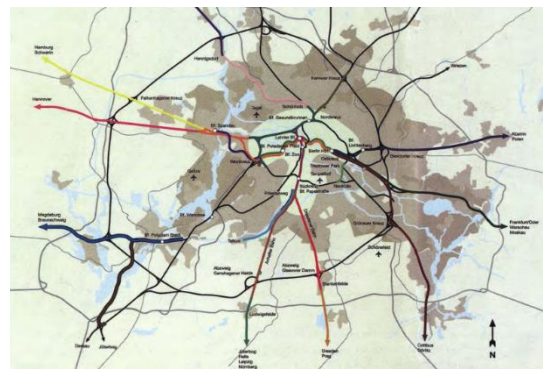


Figura 6. Conexiones Berlín [Fuente: Revista Coam]

4.3.2 ESTABLECIMIENTO DE PUNTOS DE REPARTO Y DE LA DEMANDA

Al igual que planteado en el escenario A, existen un total de 20 puntos a los que la flota tiene que suministrar mercancía (una demanda de 200 kg en cada uno de los puntos). En el escenario B1 el punto de salida y llegada de la flota estará localizado en un punto céntrico y en el B2 a las afueras de la ciudad. Los puntos son los mismos tanto para el escenario B1 y como para el B2. En las figuras 7 y 8 se observa la situación de los puntos de reparto (coordenadas en tabla 9).

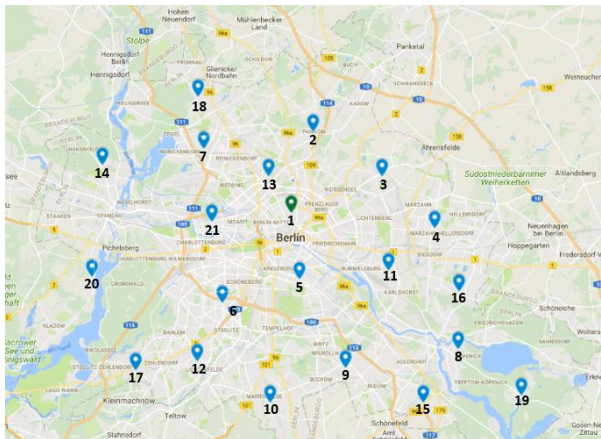


Figura 7. Distribución de puntos escenario B1

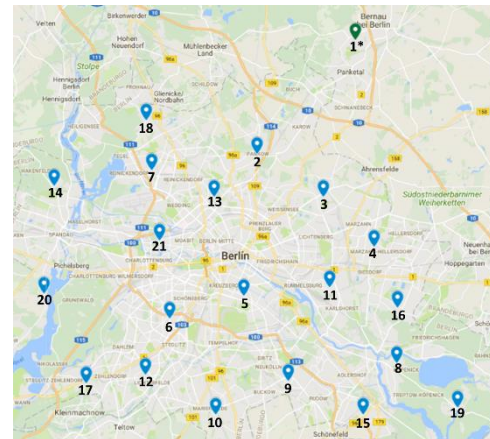


Figura 8. Distribución de puntos escenario B2

Tabla 9. Puntos de reparto para el escenario B (B1 y B2)

Punto	Coordenadas Geográficas		Coordenadas UTM		Punto	Coordenadas Geográficas		Coordenadas UTM	
	Latitud	Longitud	X [km]	Y [km]		Latitud	Longitud	X [km]	Y [km]
1 (B1)	52.5369	13.40572	391.8696	5821.9507	11	52.49720	13.51490	399.1834	5817.3772
1* (B2)	52.6737	13.5453	401.6408	5836.3962	12	52.43456	13.29937	384.3890	5810.7332
2	52.59241	13.43009	393.6567	5828.0885	13	52.56174	13.37997	390.1853	5824.7524
3	52.56194	13.50803	398.8659	5824.5874	14	52.56925	13.19234	377.4887	5825.8898
4	52.52624	13.56708	402.7895	5820.5356	15	52.40597	13.55438	401.6603	5807.1760
5	52.49072	13.4143	392.3387	5816.8017	16	52.48241	13.59467	404.5663	5815.6238
6	52.47483	13.32778	386.4239	5815.1669	17	52.42880	13.22994	379.6538	5810.2059
7	52.58051	13.30684	385.2775	5826.9538	18	52.61649	13.30032	384.9301	5830.9659
8	52.44282	13.5942	404.4487	5811.2211	19	52.41100	13.66501	409.1960	5807.5907
9	52.43026	13.46683	395.7623	5810.0002	20	52.49281	13.18007	376.4428	5817.4091
10	52.40598	13.38203	389.9368	5807.4255	21	52.53058	13.31534	385.7237	5821.3871

4.3.3 VELOCIDAD CRUCERO

Berlín, como comentado anteriormente, se trata de una ciudad de una superficie mucho mayor que Zaragoza, unas 16 veces más grande, por lo que como es previsible las redes de carreteras que comunican la ciudad está diseñada de forma distinta. Esto se traduce en una velocidad crucero de 45 km/h, que se aplicará en todo el escenario. En la tabla 10 aparecen los detalles de este cálculo.

Tabla 10. Cálculo velocidad crucero Berlín

Pto Partida	Pto. Fin	Distancia Real [km]	Distancia Euclídea [km]	Velocidad Crucero [km/h]
1	21	9.3	6.2	31.00
1	20	23.0	16.0	34.50
20	6	15.0	10.0	40.91
6	17	19.6	8.4	58.80
8	2	49.2	20.0	62.81
5	14	27.3	17.0	42.00
9	14	32.9	24.0	50.62
17	9	32.8	16.0	67.86
3	7	17.3	14.0	31.45
9	15	11.5	6.5	40.59
1	2	8.6	6.4	32.25
				44.80

4.3.4 FACTOR K

En este caso el factor k calculado es en torno a 1.7, un valor algo inferior al calculado para Zaragoza. En la tabla 11 se muestra en detalle los cálculos del factor k.

Tabla 11. Cálculo factor "k" Berlín

Pto Partida	Pto. Fin	Distancia Real [km]	Distancia Euclídea [km]	k
1	21	9.3	6.2	1.50
1	20	23.0	16.0	1.44
20	6	15.0	10.0	1.50
6	17	19.6	8.4	2.33
8	2	49.2	20.0	2.46
5	14	27.3	17.0	1.61
9	14	32.9	24.0	1.37
17	9	32.8	16.0	2.05
3	7	17.3	14.0	1.24
9	15	11.5	6.5	1.77
1	2	8.6	6.4	1.34
				1.69

4.3.5 TABLAS DE CONSUMO

A continuación se detallan las tablas de consumo para la velocidad crucero de este escenario, 45 km/h.

Tabla 12. Consumos vehículo pequeño en función del número de paradas para v=45 km/h

VEHICULO PEQUEÑO						
Paradas						
1	Peso [t]	1.53545	1.33545	0	0	0
	Consumo [kWh/t km]	0.05274	0.05603	0	0	0
	Peso*Consumo [kWh/km]	0.0810	0.0748	0	0	0
2	Peso [t]	1.73545	1.53545	1.33545	0	0
	Consumo [kWh/t km]	0.05022	0.05274	0.05603	0	0
	Peso*Consumo [kWh/km]	0.0872	0.0810	0.0748	0	0
3	Peso [t]	1.93545	1.73545	1.53545	1.33545	0
	Consumo [kWh/t km]	0.04821	0.05022	0.05274	0.05603	0
	Peso*Consumo [kWh/km]	0.0933	0.0872	0.0810	0.0748	0
4	Peso [t]	2.13545	1.93545	1.73545	1.53545	1.33545
	Consumo [kWh/t km]	0.04659	0.04821	0.05022	0.05274	0.05603
	Peso*Consumo [kWh/km]	0.0995	0.0933	0.0872	0.0810	0.0748

Tabla 13. Consumos vehículo grande en función del número de paradas para v=45 km/h

VEHICULO GRANDE										
Paradas										
1	Peso [t]	2.46531	2.26531	0	0	0	0	0	0	0
	Consumo [kWh/t km]	0.06423	0.06718	0	0	0	0	0	0	0
	Peso*Consumo [kWh/km]	0.1583	0.1522	0	0	0	0	0	0	0
2	Peso [t]	2.66531	2.46531	2.26531	0	0	0	0	0	0
	Consumo [kWh/t km]	0.06173	0.06423	0.06718	0	0	0	0	0	0
	Peso*Consumo [kWh/km]	0.1645	0.1583	0.1522	0	0	0	0	0	0
3	Peso [t]	2.86531	2.66531	2.46531	2.26531	0	0	0	0	0
	Consumo [kWh/t km]	0.05957	0.06173	0.06423	0.06718	0	0	0	0	0
	Peso*Consumo [kWh/km]	0.1707	0.1645	0.1583	0.1522	0	0	0	0	0
4	Peso [t]	3.06531	2.86531	2.66531	2.46531	2.26531	0	0	0	0
	Consumo [kWh/t km]	0.05769	0.05957	0.06173	0.06423	0.06718	0	0	0	0
	Peso*Consumo [kWh/km]	0.1768	0.1707	0.1645	0.1583	0.1522	0	0	0	0
5	Peso [t]	3.26531	3.06531	2.86531	2.66531	2.46531	2.26531	0	0	0
	Consumo [kWh/t km]	0.05605	0.05769	0.05957	0.06173	0.06423	0.06718	0	0	0
	Peso*Consumo [kWh/km]	0.1830	0.1768	0.1707	0.1645	0.1583	0.1522	0	0	0
6	Peso [t]	3.46531	3.26531	3.06531	2.86531	2.66531	2.46531	2.26531	0	0
	Consumo [kWh/t km]	0.05459	0.05605	0.05769	0.05957	0.06173	0.06423	0.06718	0	0
	Peso*Consumo [kWh/km]	0.1892	0.1830	0.1768	0.1707	0.1645	0.1583	0.1522	0	0
7	Peso [t]	3.66531	3.46531	3.26531	3.06531	2.86531	2.66531	2.46531	2.26531	0
	Consumo [kWh/t km]	0.0533	0.05459	0.05605	0.05769	0.05957	0.06173	0.06423	0.06718	0
	Peso*Consumo [kWh/km]	0.1954	0.1892	0.1830	0.1768	0.1707	0.1645	0.1583	0.1522	0
8	Peso [t]	3.86531	3.66531	3.46531	3.26531	3.06531	2.86531	2.66531	2.46531	2.26531
	Consumo [kWh/t km]	0.05213	0.0533	0.05459	0.05605	0.05769	0.05957	0.06173	0.06423	0.06718
	Peso*Consumo [kWh/km]	0.2015	0.1954	0.1892	0.1830	0.1768	0.1707	0.1645	0.1583	0.1522

5 RESULTADOS

5.1 INTRODUCCIÓN

Cada escenario consta de dos ensayos distintos a distinguir entre escenario X1 (los almacenes o punto de partida y llegada se encuentran en un punto céntrico del escenario) y escenario X2 (los almacenes o punto de partida y llegada se encuentra a las afueras de la ciudad). A continuación se detallan los resultados obtenidos de ambos escenarios.

5.2 ESCENARIO A

Este primer escenario está desarrollado en la ciudad de Zaragoza que se trata de una ciudad de tamaño pequeño/intermedio (una superficie aproximada de una cuadrícula de 10km x 10km). Así pues a continuación se muestra cuáles serían las distribuciones capilares más óptimas para cada una de las opciones combinatorias de vehículos.

5.2.1 ESCENARIO A1

En primer lugar, en la tabla 14 se pueden observar los resultados y datos de cada una de las opciones como los vehículos empleados, distancias recorridas, energía consumida y tiempo total que están los vehículos en ruta. En el anexo 4 aparece la información detallada de la ruta seguida por cada vehículo en cada una de las opciones de distribución

Tabla 14. Resultados distribuciones escenario A1

Opción	Vehículo		Distancia VG [Km]	Distancia VP [Km]	Distancia Total [Km]	Paradas		Energía Consumida con Freno Regenerativo [kWh]	Tiempo [min]
	Grande	Pequeño				VG	VP		
<u>1</u>	1	3	30.13	74.59	104.72	8	12	8.83	409
<u>2</u>	2	1	67.49	25.34	92.83	16	4	10.42	385
<u>3</u>	3	0	91.21	0.00	91.21	20	0	11.37	382
<u>4</u>	3	0	91.21	0.00	91.21	20	0	11.37	382
<u>5</u>	3	0	91.21	0.00	91.21	20	0	11.37	382
<u>6</u>	2	1	67.49	25.34	92.83	16	4	10.42	385
<u>7</u>	2	1	67.49	25.34	92.83	16	4	10.42	385
<u>8</u>	1	3	30.13	74.59	104.72	8	12	8.83	409
<u>9</u>	1	3	30.13	74.59	104.72	8	12	8.83	409
<u>10</u>	0	5	0.00	116.43	116.43	0	20	7.72	432

Como se puede apreciar en las distribuciones de la tabla 14 a pesar de que se han barajado 10 opciones tal cual se explica en el apartado 3.3.2 sólo aparecen 4 opciones distintas, ya que para algunas de las opciones como es el caso de la opción 5 (utilizar 5 VG y los que sean necesarios pequeños), la ruta queda cubierta de la forma más óptima haciendo uso únicamente 3 VG.

Se puede observar como la distancia total recorrida por los vehículos va en consonancia con el número de vehículos implicados, a menos vehículos implicados menor distancia. Esto es debido a que al utilizar un menor número de vehículos significa que el número de VG empleados es mayor. Como el VG tiene mayor capacidad implica un ahorro de distancia debido a que el número de veces que tiene que volver al punto de partida disminuye. Al recorrer una distancia menor, el tiempo también se ve reducido en proporción.

Sin embargo el consumo se comporta de manera distinta, ya que no está relacionado con el número de vehículos implicados sino con la tipología del mismo. Como se observa en las tablas

de consumo apartado 4.2.5, el vehículo grande consume más energía que el vehículo pequeño para transportar la misma cantidad de carga (si la carga es menor a 800 kg). Hay que tener en cuenta que lo mostrado en el apartado 4.2.5 es el consumo específico y que por lo tanto si tenemos en cuenta los distintos tramos y distancias recorridas el consumo del VG es superior al de varios VP para cargas superiores a 800 kg. Esto es debido al mayor POM que presenta el vehículo grande frente al vehículo pequeño.

En la tabla 15 se muestran los resultados de cada una de las funciones objetivo teniendo en cuenta dos costes de electricidad distintos detallados en el apartado 3.1.8. El código de colores mostrado refleja la peor (color rojo) y la mejor distribución (color verde) para cada una de las funciones objetivo.

Tabla 15. Resultados funciones objetivo escenario A1

Opción	Vehículo		F. OBJ f1 [€]	F. OBJ f1 [€]	F. OBJ f2 [€]	F. OBJ f2 [€]
	Grande	Pequeño	Coste Electr. Pesí.	Coste Electr. Real.	Coste Electr. Pesí.	Coste Electr. Real.
<u>1</u>	1	3	2.03	1.44	62.53	61.95
<u>2</u>	2	1	2.39	1.70	59.38	58.69
<u>3</u>	3	0	2.61	1.86	59.11	58.36
<u>4</u>	3	0	2.61	1.86	59.11	58.36
<u>5</u>	3	0	2.61	1.86	59.11	58.36
<u>6</u>	2	1	2.39	1.70	59.38	58.69
<u>7</u>	2	1	2.39	1.70	59.38	58.69
<u>8</u>	1	3	2.03	1.44	62.53	61.95
<u>9</u>	1	3	2.03	1.44	62.53	61.95
<u>10</u>	0	5	1.77	1.26	65.74	65.23

Por un lado, en la función objetivo 1 se tiene en cuenta únicamente el impacto económico que tiene el consumo energético de los vehículos. Así pues, en la función 1, la diferencia entre considerar el coste de la electricidad realista o pesimista radica en la propia diferencia de estos costes, no variando la distribución óptima.

Respecto a la función objetivo 2 se tiene en cuenta la operativa de distribución completa (factor humano + factor consumo). Como se puede observar hay una gran diferencia entre una función y otra siendo mucho más influyente en el impacto económico el factor de coste horario humano.

Curiosamente se observa como desde el punto de vista del consumo la mejor opción es emplear 5 vehículos pequeños para cubrir la distribución pero si tenemos en cuenta el factor humano, al recorrer más distancia, implica mayor coste de personal y por lo tanto hace que esta sea la peor opción. Concretamente, usar 3 VG en lugar de 5 VP supone un ahorro del 11.21%

Al encontrarse el punto de partida y final en una zona céntrica se puede observar como las distribuciones más óptimas de cada una de las opciones tienen la típica forma de flor. Esta forma se debe a que cada vehículo reparte a un máximo de 4 u 8 puntos dependiendo de si se trata de un VP o un VG y vuelve al punto de partida. Las distintas distribuciones se muestran en la figura 9. Como se puede observar, después de estudiar las 10 opciones solo hay 4 combinatorias distintas que son emplear 1 VG y 3 VP, 2 VG y 1 VP, 3 VG o 5 VP.

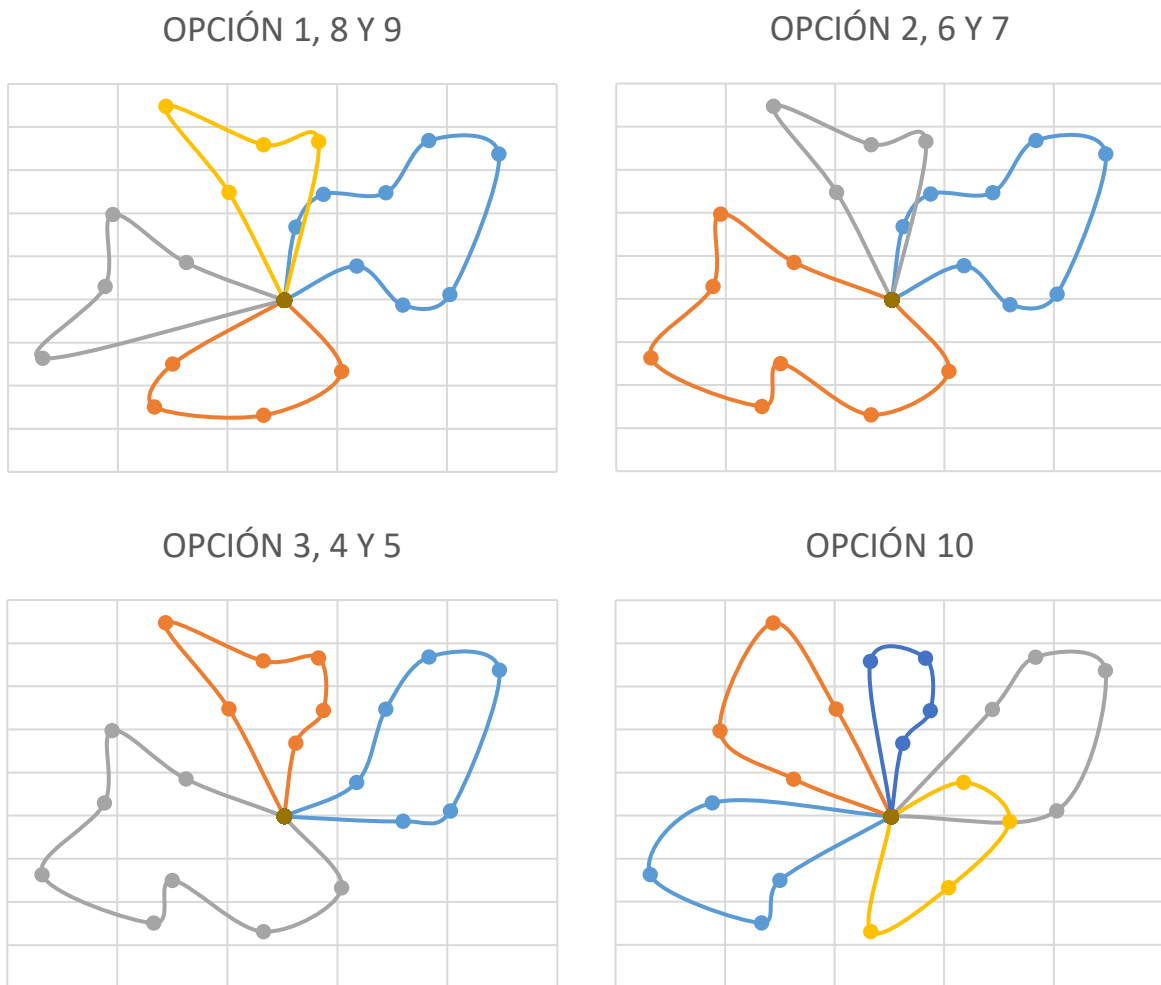


Figura 9. Distribuciones de las distintas opciones estudiadas escenario A1

5.2.2 ESCENARIO A2

En este escenario el punto del cuál la flota parte está a las afueras de la ciudad por lo que las distancias recorridas con respecto al escenario A1 aumentan considerablemente como se observa en la tabla 16.

El recorrido más óptimo en distancia se consigue con 3 VG o 2 VG y 1 VP a pesar de que desde el punto de vista energético la distribución más favorable vuelve a ser la formada por 5 VP. A pesar de que esta es la opción más favorable en cuanto a consumo energético es la que más distancia recorre y a la que más tiempo le lleva la distribución de mercancía.

Tabla 16. Resultados distribuciones escenario A2

Opción	Vehículo		Distancia VG [Km]	Distancia VP [Km]	Distancia Total [Km]	Paradas VG	Paradas VP	Energía Consumida con Freno Regenerativo [kWh]	Tiempo [min]
	Grande	Pequeño							
<u>1</u>	1	3	63.21	103.84	167.05	8	12	15.01	533
<u>2</u>	2	1	109.63	29.93	139.56	16	4	16.16	478
<u>3</u>	3	0	139.56	0.00	139.56	20	0	17.65	478
<u>4</u>	3	0	139.56	0.00	139.56	20	0	17.65	478
<u>5</u>	3	0	139.56	0.00	139.56	20	0	17.65	478
<u>6</u>	2	1	109.63	29.93	139.56	16	4	16.16	478
<u>7</u>	2	1	109.63	29.93	139.56	16	4	16.16	478
<u>8</u>	1	3	63.21	103.84	167.05	8	12	15.01	533
<u>9</u>	1	3	63.21	103.84	167.05	8	12	15.01	533
<u>10</u>	0	5	0.00	208.57	208.57	0	20	14.00	616

Al igual que en el escenario anterior, el número de vehículos implicados en la distribución afecta directamente a la distancia total recorrida. Además al aumentar la distancia el tiempo total que están los vehículos funcionando también aumenta y por lo tanto lo hará el coste horario del personal como se observa en la tabla 17.

Tabla 17. Resultados funciones objetivo escenario A2

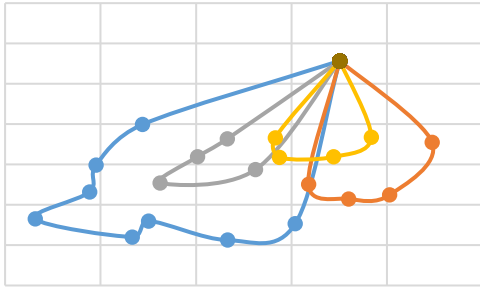
Opción	Vehículo		F. OBJ f1 [€]	F. OBJ f1 [€]	F. OBJ f2 [€]	F. OBJ f2 [€]
	Grande	Pequeño	Coste Electr. Pesí.	Coste Electr. Real.	Coste Electr. Pesí.	Coste Electr. Real.
<u>1</u>	1	3	3.45	2.45	82.41	81.41
<u>2</u>	2	1	3.71	2.64	74.53	73.46
<u>3</u>	3	0	4.05	2.88	74.87	73.70
<u>4</u>	3	0	4.05	2.88	74.87	73.70
<u>5</u>	3	0	4.05	2.88	74.87	73.70
<u>6</u>	2	1	3.71	2.64	74.53	73.46
<u>7</u>	2	1	3.71	2.64	74.53	73.46
<u>8</u>	1	3	3.45	2.45	82.41	81.41
<u>9</u>	1	3	3.45	2.45	82.41	81.41
<u>10</u>	0	5	3.21	2.29	94.47	93.54

De la misma forma que en el escenario anterior, la diferencia entre suponer un precio pesimista o realista a la hora de comparar opciones es “irrelevante” a la hora de analizar la función 1 ya que aumenta el coste de cada una de las opciones un porcentaje determinado, concretamente un aumento del 40.54% sobre el precio realista. A la hora de analizar la función 2 se puede observar como la parte de la función que depende del consumo energético prácticamente no afecta con respecto a la parte de coste horario.

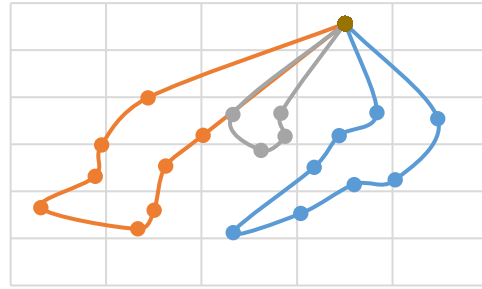
La mejor opción analizando la función objetivo 2, que tiene en cuenta los costes totales de la operativa de reparto, es aquella en la que se emplean 2 VG y 1 VP. Sin embargo, paradójicamente, utilizar 5 VP vuelve a ser la peor opción desde el punto de vista de costes totales pero es la mejor si solo se considera el coste energético.

En la figura 10 se muestran las distintas distribuciones de los vehículos. Más información acerca de los puntos por los que pasa cada vehículo y de su consumo individual se detalla en el anexo 4.

OPCIÓN 1, 8 Y 9



OPCIÓN 2, 3, 4, 5, 6 Y 7



OPCIÓN 10

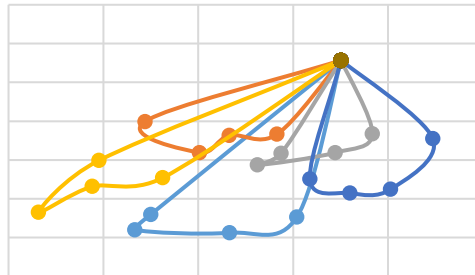


Figura 10. Distribuciones distintas opciones planteadas escenario A2

5.3 ESCENARIO B

Este escenario está ubicado en Berlín que, a diferencia del escenario A, se trata de una ciudad de grandes dimensiones (40km x 40km), aproximadamente 16 veces más grande en superficie que Zaragoza. De la misma forma a continuación se detallan los resultados de los cálculos realizados acerca del escenario B1 y B2.

5.3.1 ESCENARIO B1

Al tratarse de un escenario más grande que el escenario A la distancia total recorrida aumenta en consecuencia como se observa en la tabla 18. Respecto al tiempo total utilizado por el total de los vehículos se pudo ver como a pesar de aumentar no lo hace en proporción a la distancia. Esto es debido a que la velocidad cruce en este escenario es superior que en los escenarios A (pasa de 30 km/h a 45 km/h).

Tabla 18. Resultados distribuciones escenario B1

Opción	Vehículo		Distancia VG [Km]	Distancia VP [Km]	Distancia Total [Km]	Paradas VG	Paradas VP	Energía Consumida con Freno Regenerativo [kWh]	Tiempo [min]
	Grande	Pequeño							
<u>1</u>	1	3	101.35	186.22	287.57	8	12	33.42	583
<u>2</u>	2	1	202.02	52.41	254.43	16	4	39.61	539
<u>3</u>	3	0	254.43	0.00	254.43	20	0	43.62	539
<u>4</u>	3	0	254.43	0.00	254.43	20	0	43.62	539
<u>5</u>	3	0	254.43	0.00	254.43	20	0	43.62	539
<u>6</u>	2	1	202.02	52.41	254.43	16	4	39.61	539
<u>7</u>	2	1	202.02	52.41	254.43	16	4	39.61	539
<u>8</u>	1	3	101.35	186.22	287.57	8	12	33.42	583
<u>9</u>	1	3	101.35	186.22	287.57	8	12	33.42	583
<u>10</u>	0	5	0.00	327.64	327.64	0	20	27.84	637

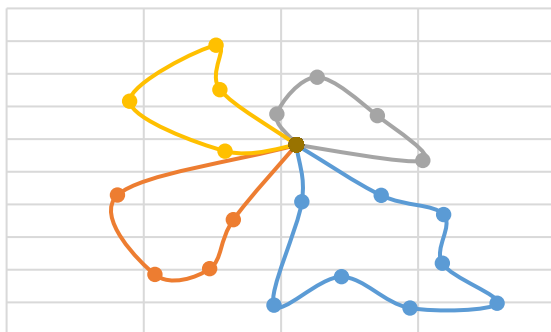
Analizando la tabla 19, se vuelve a observar como respecto a la función 1, que hace relación al consumo energético, la mejor opción vuelve a ser la utilización de 5 VP y la peor el uso de 3 VG. Observando la función 2, la peor opción se da cuando se utilizan 5 VP y la mejor cuando se utilizan 2 VG y 1 VP. En caso de utilizar 3 VG en lugar de 2 VG y 1 VP se observa como la diferencia en coste es mínima.

Tabla 19. Resultados funciones objetivo escenario B1

Opción	Vehículo		F. OBJ f1 [€]	F. OBJ f1 [€]	F. OBJ f2 [€]	F. OBJ f2 [€]
	Grande	Pequeño	Coste Electr. Pesí.	Coste Electr. Real.	Coste Electr. Pesí.	Coste Electr. Real.
<u>1</u>	1	3	7.67	5.46	93.94	91.73
<u>2</u>	2	1	9.09	6.47	88.82	86.19
<u>3</u>	3	0	10.02	7.13	89.74	86.85
<u>4</u>	3	0	10.02	7.13	89.74	86.85
<u>5</u>	3	0	10.02	7.13	89.74	86.85
<u>6</u>	2	1	9.09	6.47	88.82	86.19
<u>7</u>	2	1	9.09	6.47	88.82	86.19
<u>8</u>	1	3	7.67	5.46	93.94	91.73
<u>9</u>	1	3	7.67	5.46	93.94	91.73
<u>10</u>	0	5	6.39	4.55	100.57	98.72

En la figura 11 se puede observar las distribuciones de cada una de las opciones y como se puede observar ocurre al igual que en el escenario A, al ser una distribución con el almacén en un punto céntrico, las distribuciones óptimas dibujan una silueta parecida.

OPCIÓN 1, 8 Y 9



OPCIÓN 2, 3, 4, 5, 6 Y 7



OPCIÓN 10

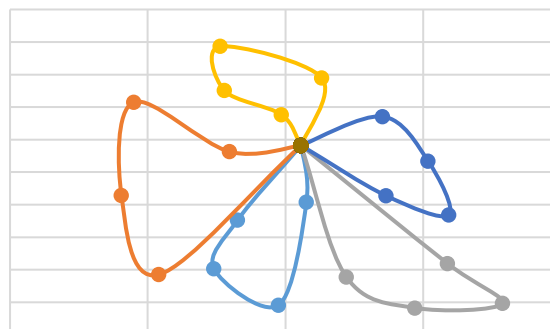


Figura 11. Distribuciones distintas opciones planteadas escenario B1

5.3.2 ESCENARIO B2

Por último, en este escenario se mantienen los puntos en los que se debe dejar mercancía pero el punto de partida se sitúa a las afueras de la ciudad. Los datos obtenidos acerca de dicho ensayo se encuentran recogidos en las tablas 20 y 21.

Tabla 20. Resultados distribuciones escenario B2

Opción	Vehículo		Distancia VG [Km]	Distancia VP [Km]	Distancia Total [Km]	Paradas VG	Paradas VP	Energía Consumida con Freno Regenerativo [kWh]	Tiempo [min]
	Grande	Pequeño							
<u>1</u>	1	3	149.77	295.53	445.30	8	12	51.25	794
<u>2</u>	2	1	282.90	79.61	362.51	16	4	56.22	683
<u>3</u>	3	0	362.51	0.00	362.51	20	0	62.38	683
<u>4</u>	3	0	362.51	0.00	362.51	20	0	62.38	683
<u>5</u>	3	0	362.51	0.00	362.51	20	0	62.38	683
<u>6</u>	2	1	282.90	79.61	362.51	16	4	56.22	683
<u>7</u>	2	1	282.90	79.61	362.51	16	4	56.22	683
<u>8</u>	1	3	149.77	295.53	445.30	8	12	51.25	794
<u>9</u>	1	3	149.77	295.53	445.30	8	12	51.25	794
<u>10</u>	0	5	0.00	528.13	528.13	0	20	45.73	904

Al encontrarse el punto de partida a las afueras de la ciudad la distancia recorrida en cada una de las opciones aumenta considerablemente (aumentan del 57.8%). A la par aumenta el tiempo empleado en realizar la distribución de mercancía y la energía consumida.

Al igual que en los escenarios anteriores se observa como la opción que menos energía consume es la opción 10 en la que se utilizan únicamente vehículos pequeños. Está opción implica una mayor distancia recorrida y por lo tanto un mayor coste horario por lo que teniendo en cuenta la operativa de reparto completa es la peor opción.

Si el criterio de decisión es la función objetivo 2, la mejor opción es la que se emplean 2 VG y 1 VP aunque la opción en la que se emplean 3 VG es prácticamente igual de rentable.

Tabla 21. Resultados funciones objetivo escenario B2

Opción	Vehículo		F. OBJ f1 [€]	F. OBJ f1 [€]	F. OBJ f2 [€]	F. OBJ f2 [€]
	Grande	Pequeño	Coste Electr. Pesí.	Coste Electr. Real.	Coste Electr. Pesí.	Coste Electr. Real.
<u>1</u>	1	3	11.65	8.29	129.05	125.69
<u>2</u>	2	1	12.78	9.09	113.84	110.15
<u>3</u>	3	0	14.18	10.09	115.24	111.15
<u>4</u>	3	0	14.18	10.09	115.24	111.15
<u>5</u>	3	0	14.18	10.09	115.24	111.15
<u>6</u>	2	1	12.78	9.09	113.84	110.15
<u>7</u>	2	1	12.78	9.09	113.84	110.15
<u>8</u>	1	3	11.65	8.29	129.05	125.69
<u>9</u>	1	3	11.65	8.29	129.05	125.69
<u>10</u>	0	5	10.39	7.40	144.15	141.15

Al igual que sucede con el escenario A2, al encontrarse el punto de partida fuera de la ciudad, la distribución no tiene la típica forma de flor sino que es similar a la observada en el escenario A2 como se observa en la figura 12.

Figura 12. Distribuciones distintas opciones planteadas escenario B2

6 CONCLUSIONES

Como reflejan numerosos estudios, el futuro del transporte estará en el uso de los vehículos eléctricos [50] debido a la cantidad de ventajas que presentan frente a los vehículos convencionales (menor contaminación ambiental y acústica, mayor eficiencia energética, menor coste de mantenimiento,...). Por ello, el objetivo principal del presente proyecto es el desarrollo de unas funciones objetivo que permitan estudiar, analizar y determinar la distribución capilar más óptima de una flota de vehículos eléctricos ante un escenario concreto, así como el desarrollo de una herramienta que permite la comparación y análisis de distintas opciones de distribución.

6.1 COMPARACIÓN CONSUMO VP Y VG

En la figura 13 se muestra el consumo específico que supone trasladar una determinada cantidad de carga dependiendo de la selección de los vehículos implicados en dicho transporte.

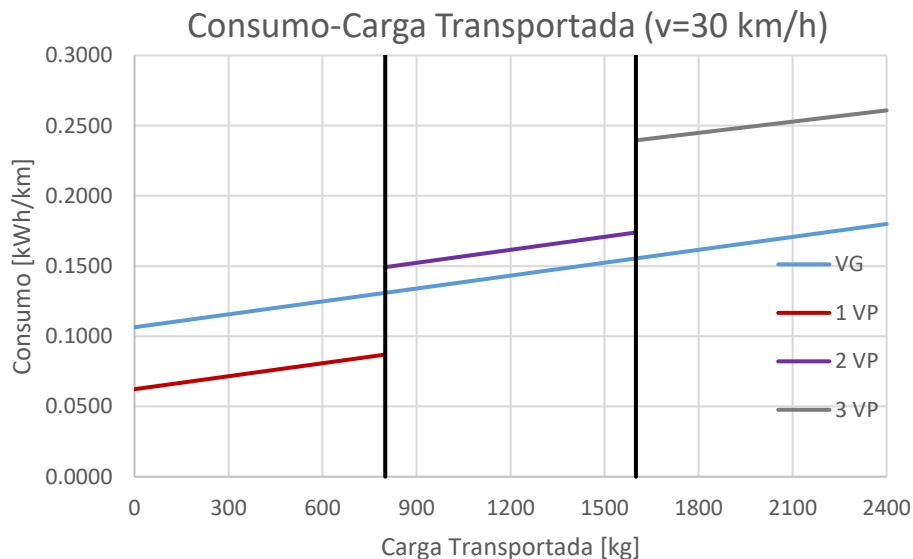


Figura 13. Comparación consumos entre VP y VG

Así pues se puede ver que para un recorrido con carga constante es preferible utilizar un VP a un VG para cargas menores a 800 kg. Si la carga es superior a 800 kg sería preferible emplear 1 VG a 2 VP. Esto solo es válido para recorridos con carga constante. Si la carga va decreciendo, como se ha visto en el capítulo 5, es preferible el uso de vehículos pequeños a vehículos grandes desde el punto de vista de consumo energético.

6.2 PANORAMA ACTUAL

La función objetivo de consumo (f_1) tiene en cuenta únicamente el consumo energético de la flota en la distribución capilar. Sin embargo, la función objetivo operativa (f_2) es una suma de la función de consumo y la función de coste horario del personal en la cual el consumo energético pasa a tener una influencia del 5-10% con respecto al total. Es decir, en el panorama actual se tiene en cuenta con la función el impacto del vehículo y el conductor.

En las distribuciones optimizadas se ha tenido en cuenta el efecto del **factor “k”** (ver apartado 3.1.5). Este factor ha influido en la búsqueda de la ruta óptima ya que tiene una repercusión indirecta sobre la autonomía de los vehículos (las distancias aumentan al aplicar este factor).

La función 2 ha sido diseñada para el estudio del panorama actual teniendo en cuenta el impacto económico de la distribución de mercancías desde la perspectiva de un empresario con una flota de vehículos determinada y unos empleados fijos. En el caso de estudio, dependiendo de los vehículos implicados (flota de 5 VP y 5 VG), siempre teniendo en cuenta que la ruta planteada está optimizada en función de la distancia recorrida (véase apartado 3.3), el resultado varía entre los valores que se observan en la tabla 22.

Tabla 22. Comparación función objetivo 2

	Mejor distribución f2				Peor Distribución f2				Variación dist [%]	Variación f2 [%]
	Opción	Vehículos	Dist [km]	f2 C. Realista [€]	Opción	Vehículos	Dist [km]	f2 C. Realista [€]		
ESCENARIO A1	3, 4, 5	3 VG	91.21	58.36	10	5 VP	116.43	65.23	27.7	11.8
ESCENARIO A2	2, 5, 6	2 VG y 1 VP	139.56	73.46	10	5 VP	208.57	93.54	49.4	27.3
ESCENARIO B1	2, 5, 6	2 VG y 1 VP	254.43	88.82	10	5 VP	327.64	100.57	28.8	13.2
ESCENARIO B2	2, 5, 6	2 VG y 1 VP	362.51	110.15	10	5 VP	528.13	141.15	45.7	28.1

En conclusión, para los 4 escenarios planteados la **peor distribución** es aquella en la que se emplean 5 VP ya que la distancia recorrida es entre un 27.7 y un 45.7% superior respecto a la mejor distribución lo que se traduce en un aumento del coste de distribución de entre el 11.8 y el 28.1%. Esta diferencia entre la variación de la distancia recorrida y la variación sobre la función completa se debe en que hay un término fijo que se corresponde con el tiempo de carga y descarga de material.

Respecto a la **mejor distribución** para los escenarios planteados se observa que son aquellas en las que se utilizan 3 VG o 2 VG y 1 VP, es decir, aquella distribución en la que la distancia recorrida es menor. Una menor distancia recorrida implica que los vehículos tengan mayor capacidad y por ende mayor consumo pero, como comentado, el impacto económico del consumo es solo del 5-10% con respecto al total. Además, en los escenarios A2, B1 y B2, la diferencia entre utilizar 2 VG y 1 VP o 3 VG es mínima como se muestra en la tabla 23 (la única diferencia es que uno de los vehículos es pequeño en lugar de grande pero la ruta y por ende la distancia recorrida, es la misma).

Tabla 23. Comparación entre opción “2, 5, 6” y “3, 4, 5”

	Opción	Vehículos	Dist [km]	f2 C. Realista [€]	Variación f2 [%]
ESCENARIO A2	2, 5, 6	2 VG y 1 VP	139.56	73.46	0.33
	3, 4, 5	3 VG	139.56	73.7	
ESCENARIO B1	2, 5, 6	2 VG y 1 VP	254.43	86.19	0.77
	3, 4, 5	3 VG	254.43	86.85	
ESCENARIO B2	2, 5, 6	2 VG y 1 VP	362.51	110.15	0.91
	3, 4, 5	3VG	362.51	111.15	

La fluctuación del **coste de la electricidad** (entre pesimista y realista) no tiene influencia a la hora de calcular la distribución más óptima. La influencia que tiene sobre la cuantía total también es mínima y las variaciones en los costes totales no llegan al 4% sobre el precio realista (ver tabla 24).

Tabla 24. Influencia del precio de la electricidad en los diferentes escenarios

Opción	f2 A1 [€]		Variación [%]	f2 A2 [€]		Variación [%]	f2 B1 [€]		Variación [%]	f2 B2 [€]		Variación [%]
	C. Pes	C. Rea		C. Pes	C. Rea		C. Pes	C. Rea		C. Pes	C. Rea	
<u>1</u>	62.53	61.95	0.94	82.41	81.41	1.22	93.94	91.73	2.41	129.05	125.69	2.67
<u>2</u>	59.38	58.69	1.18	74.53	73.46	1.46	88.82	86.19	3.04	113.84	110.15	3.35
<u>3</u>	59.11	58.36	1.29	74.87	73.70	1.59	89.74	86.85	3.33	115.24	111.15	3.68
<u>4</u>	59.11	58.36	1.29	74.87	73.70	1.59	89.74	86.85	3.33	115.24	111.15	3.68
<u>5</u>	59.11	58.36	1.29	74.87	73.70	1.59	89.74	86.85	3.33	115.24	111.15	3.68
<u>6</u>	59.38	58.69	1.18	74.53	73.46	1.46	88.82	86.19	3.04	113.84	110.15	3.35
<u>7</u>	59.38	58.69	1.18	74.53	73.46	1.46	88.82	86.19	3.04	113.84	110.15	3.35
<u>8</u>	62.53	61.95	0.94	82.41	81.41	1.22	93.94	91.73	2.41	129.05	125.69	2.67
<u>9</u>	62.53	61.95	0.94	82.41	81.41	1.22	93.94	91.73	2.41	129.05	125.69	2.67
<u>10</u>	65.74	65.23	0.78	94.47	93.54	0.99	100.57	98.72	1.87	144.15	141.15	2.12

La **influencia del freno regenerativo** sobre el resultado total es mínima por lo que no es un factor a tener en cuenta. En la tabla 25 se muestra, sobre el escenario B2 (en el cual se recorren mayores distancias), la influencia que tiene pasar de una recuperación de energía del 1% al 10%¹¹. Como se observa, la influencia sobre el resultado final es menor al 1%.

Tabla 25. Influencia de la recuperación de energía por efecto del freno regenerativo

Opción	Vehículos		Distancia [km]	Energía consumida [kWh]		f2 C. Realista [€]	
	VP	VP		Recup. Ener 1%	Recup. Ener 10%	Recup. Ener 1%	Recup. Ener 10%
<u>1</u>	1	3	445.30	51.25	46.12	125.69	124.94
<u>2</u>	2	1	362.51	56.22	50.60	110.15	109.33
<u>3</u>	3	0	362.51	62.38	56.14	111.15	110.23
<u>4</u>	3	0	362.51	62.38	56.14	111.15	110.23
<u>5</u>	3	0	362.51	62.38	56.14	111.15	110.23
<u>6</u>	2	1	362.51	56.22	50.60	110.15	109.33
<u>7</u>	2	1	362.51	56.22	50.60	110.15	109.33
<u>8</u>	1	3	445.30	51.25	46.12	125.69	124.94
<u>9</u>	1	3	445.30	51.25	46.12	125.69	124.94
<u>10</u>	0	5	528.13	45.73	41.16	141.15	140.48

Se aprecia como **el tamaño del escenario** no influye demasiado en la distribución óptima ya que en ambos escenarios, las distribuciones óptimas obtenidas son similares. Por otra parte, el estudio de la distribución óptima bajo la misma metodología en ciudades más extensas que Berlín, como podría ser Los Ángeles (EEUU), sería ilógico debido a que la estrategia de distribución en ciudades tan extensas consiste en dividir el área a repartir en zonas más reducidas.

En lo que respecta a la **velocidad crucero**, puede variar y varía a lo largo del día dependiendo de la semaforización, hora de circulación, climatología,... Por ello se ha tomado un valor orientativo a media mañana un día laboral. Si el valor de la velocidad calculado se redujera en el escenario de Berlín debido, por ejemplo, a climatología adversa de 45 km/h a 30 km/h, se puede observar en la tabla 26 que no influye en la toma de decisión de la mejor distribución. Aun así, se puede ver como hay un aumento del coste de aproximadamente el 25% a pesar de que la energía

¹¹ Se ha considerado una recuperación de energía del 10% suponiendo una eficiencia del sistema excepcionalmente alta y que solo se da en vehículos pesados y con frenadas largas y progresivas como es el caso de los trenes

consumida disminuye un 25%. Esto se debe a que al reducirse la velocidad el tiempo de la operativa aumenta considerablemente y por lo tanto el coste humano.

Tabla 26. Influencia de la velocidad crucero

Opción	Vehículos		Distancia [km]	Energía consumida [kWh]		Tiempo [min]		f2 C. realista [€]	
	VP	VP		v=30 km/h	v=45 km/h	v=30 km/h	v=45 km/h	v=30 km/h	v=45 km/h
<u>1</u>	1	3	287.57	25.38	33.42	775	583	118.80	91.73
<u>2</u>	2	1	254.43	29.49	39.61	709	539	109.65	86.19
<u>3</u>	3	0	254.43	32.10	43.62	709	539	110.08	86.85
<u>4</u>	3	0	254.43	32.10	43.62	709	539	110.08	86.85
<u>5</u>	3	0	254.43	32.10	43.62	709	539	110.08	86.85
<u>6</u>	2	1	254.43	29.49	39.61	709	539	109.65	86.19
<u>7</u>	2	1	254.43	29.49	39.61	709	539	109.65	86.19
<u>8</u>	1	3	287.57	25.38	33.42	775	583	118.80	91.73
<u>9</u>	1	3	287.57	25.38	33.42	775	583	118.80	91.73
<u>10</u>	0	5	327.64	21.77	27.84	855	637	130.07	98.72

Otro punto a tener en cuenta es la **situación del punto de partida**. El hecho de que el punto de partida se encuentre a las afueras de la ciudad supone en el escenario A un aumento de la distancia recorrida del 53% y un aumento del coste económico del 25.8%. En el escenario B ocurre parecido con valores del 57.8% y 38.5% respectivamente. Para evitar este sobre coste y siempre dependiendo del volumen a repartir se podría estudiar la viabilidad económica, que depende de numerosos factores, de disponer de uno o varios almacenes en puntos estratégicos a partir de los cuáles se reparta la mercancía.

6.3 PANORAMA FUTURO

A la par que el futuro del transporte se está dirigiendo hacia un uso del vehículo eléctrico también lo está haciendo hacia la automatización de los vehículos, convirtiendo el factor humano en prescindible. Cuando esto ocurra, las empresas de distribución de mercancía, tanto a nivel primario, como secundario y capilar, se harán eco de estos avances convirtiéndose el factor del consumo energético automáticamente en prioritario.

En el momento que esto ocurra la función objetivo a tener en cuenta a la hora de organizar la operativa de reparto será la función objetivo de consumo (f1) donde se observa como el precio de la electricidad tiene un impacto directo sobre el coste total de la operativa de reparto. Además, el consumo de los vehículos pasa a ser el factor prioritario siendo preferible, en todos los casos estudiados, el uso exclusivo de vehículos pequeños. El uso exclusivo de VP llega a reportar beneficios del 36% al 57% sobre el uso de VG. Cabe comentar que desde el criterio de la operativa de reparto completa (teniendo en cuenta el coste humano) la opción en la cual se utilizan sólo VP siempre es la más desfavorable.

En la tabla 27 se puede observar el sobre coste que tendría emplear en un futuro eléctrico y automatizado los mismos criterios de decisión aplicados en el panorama actual.

Tabla 27. Comparativa del consumo de energía según opción de distribución

	Configuración mejor distribución actual				Configuración mejor distribución futuro autónomo				Sobrecoste [%]
	Opción	Vehículos	Distancia [km]	f1 [€]	Opción	Vehículos	Distancia [km]	f1 [€]	
ESCENARIO A1	3, 4 y 5	3 VG	91.21	1.86	10	5 VP	116.43	1.26	47.6
ESCENARIO A2	2, 6 y 7	2 VG Y 1 VP	139.56	2.64	10	5 VP	208.57	2.29	15.3
ESCENARIO B1	2, 6 y 7	2 VG Y 1 VP	254.53	6.47	10	5 VP	327.64	4.55	42.2
ESCENARIO B2	2, 6 y 7	2 VG Y 1 VP	362.51	9.09	10	5 VP	528.13	7.4	22.8

Al igual que en el panorama actual, se podría estudiar la viabilidad económica de la integración de un almacén en un punto intermedio a pesar de que el coste total que supone tener el almacén a las afueras no es tan alto como en el caso de que los vehículos precisen de conductor.

6.4 SÍNTESIS DE LAS CONCLUSIONES

Se han cumplido con los objetivos planteados en el presente proyecto, a continuación se realiza un pequeño resumen de las conclusiones que se han comentado a lo largo de este apartado:

- En un panorama actual la distribución óptima es aquella en la que como norma general se emplean vehículos grandes y la peor la que utiliza vehículos pequeños. En un futuro donde los vehículos circulen de manera autónoma, la mejor opción a los escenarios planteados sería la contraria, utilización exclusiva de vehículos pequeños, y la peor, la utilización de vehículos grandes.
- En la actualidad, considerando una flota de vehículos eléctricos, el factor más influyente en la obtención de la distribución capilar óptima es el factor humano. El factor humano, que tiene una influencia del 90-95% sobre el coste final, está directamente relacionado con la distancia recorrida por los vehículos y por lo tanto la distribución óptima será aquella en la que menos distancia total recorran los vehículos.

Respecto al resto de factores:

- El coste de la electricidad tiene influencia prácticamente nula (2-3%) sobre el coste total.
 - El efecto del freno regenerativo tiene baja influencia sobre la distribución óptima, presentando variaciones inferiores al 1% sobre el coste final suponiendo una recuperación de energía por el freno regenerativo del 10% (muy superior a la recuperación de energía que se da en condiciones normales).
 - La velocidad cruceo tiene una influencia directa sobre el coste total pero no influye en la selección de la distribución óptima (afecta por igual a las distintas opciones).
 - El tamaño de la ciudad no es determinante debido a que los vehículos poseen una autonomía suficiente para realizar casi cualquier ruta de distribución urbana.
- En un futuro, en el cual los vehículos sean eléctricos y autónomos, el factor determinante será el consumo eléctrico y por lo tanto en estos escenarios concretos sería preferible utilizar exclusivamente los vehículos pequeños por su alta relación “Carga transportada-Peso”.
 - En el caso de que los vehículos fueran eléctricos y autónomos el precio electricidad no tendría ninguna influencia a la hora de determinar la distribución óptima (afecta de igual manera a cada una de las distribuciones propuestas) pero la influencia sobre el coste final del transporte sería directa.

- El disponer de los almacenes (punto de partida y llegada de los vehículos) a las afueras de la ciudad supone un sobrecoste del 25.8% en el caso del escenario A y un 38.5% en el escenario B por lo que sería interesante estudiar la viabilidad económica de la integración de uno o varios almacenes en puntos estratégicos. En un posible análisis acerca de la viabilidad de la integración de este sistema es importante considerar los riesgos que conlleva como la inversión económica, el uso real del almacén, los numerosos factores que afectan a la viabilidad económica,...

6.5 FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

En lo que respecta a investigaciones futuras, estas son algunas de las líneas que podrían investigarse a partir de este proyecto:

- Estudio y análisis del comportamiento de la aplicación de la herramienta desarrollada a distintos diseños de ciudades como Barcelona (diseño hipodámico) o Madrid (diseño irregular)
- Estudio y análisis de escenarios con un número superior de puntos de reparto simulando una empresa de transporte de un tamaño grande, integrando una mayor cantidad y variedad de vehículos
- Estudio de la influencia de las ventanas temporales simulando un ciclo de distribución normal
- Análisis de la viabilidad técnica y económica de la aplicación de la integración de un almacén en el centro de la ciudad sobre los escenarios planteados en el presente trabajo a través del desarrollo de una herramienta de decisión
- Integración de la herramienta desarrollada junto con el software empleado:
 - VRP Solver que permite calcular la ruta óptima en función de la distancia
 - Herramienta de cálculo de coordenadas UTM a partir de coordenadas geográficas
 - Software automóviles eléctricos v1.0

BIBLIOGRAFÍA

1. *Almacenamiento, centros de distribución y operaciones*. Disponible en: https://d2vvqscadf4c1f.cloudfront.net/BKFpa0v7Sh2nejFSyoNW_Almacenamiento.pdf
2. *Logística empresarial: control y planificación*. **Ballou, R. H.** 1995, Díaz de Santos, págs 665
3. *Future Shaping at GPT*. **Cameron, M.** 2012, The Australian
4. *The economy's dark continent*. **Drucker, P. F.** 1962, Fortune, 65, págs 265-270
5. *CO₂. Earth is an independent, citizen-led Initiative*. ProOxygen. 2018. Disponible en: <https://www.co2.earth/2100-projections>
6. *An Effective Heuristic Algorithm for the Traveling- Salesman Problem*. **Lin, S., Kernighan, B. W.** 1973, The Institute for Operations Research and the Management Sciences
7. *An efficient heuristic procedure for partitioning graphs*. **Lin, S., Kernighan, B. W.** 1970, The Bell System Technical Journal, Volume 49, 2, págs 291-307
8. *An Effective Implementation of the Lin-Kernighan Traveling Salesman Heuristic*. **Helsgaun, K.**
9. *Ant system: optimization by colony of cooperating agents*. **Dorigo, K., Maniezzo, V. y Coloni, A.** 1996, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics), Volume 26, 1, págs 29-41
10. *Some Simple Applications of the Travelling Salesman Problem*. **Lenstra, J. K. y Rinnooy Kan, A. H. G.** 2017, Journal of the Operational Research Society, Volume 26, 4, págs 713-733
11. *Matching, Euler tours and the Chinese postman*. **Edmonds, J. y Johnson, E. L.** 1972, Mathematical Programming, Volume 5, 1, págs 88-124
12. *Chinese Postman Problem*. Utdallas.edu. Disponible en: <http://www.utdallas.edu/~dzdu/cs6363/Chinese.htm>
13. *The Truck Dispatching Problem*. **Dantzig, G. B. y Ramser, J. H.** 1959, The institute for Operations Research and the Management Sciences
14. *Scheduling of Vehicles from a Central Depot to a Number of Delivery Points*. **Clarke, G. y Wright, J. K.** 1964, The institute for Operations Research and the Management Sciences
15. *A simple and effective evolutionary algorithm for the vehicle routing problem*. **Prins, C.** 2004, Computers & Operations Research, Volume 31, 12, págs 1985-2002
16. *Algorithms for the Vehicle Routing and Scheduling Problems with Time Window Constraints*. **Solomon, M. M.** 1987, The institute for Operations Research and the Management Sciences
17. *A New Optimization Algorithm for the Vehicle Routing Problem with Time Windows*. **Desrochers, M., Desrosiers, J. y Solomon, M. M.** 1992, Operations Research, Volume 40, 2, págs 342-354
18. *An approach to prioritize code smells for refactoring*. **Vidal, S., Marcos, C. y Díaz-Pace, A.** 2014, Automated Software Engineering, págs 1-32.
19. *Optaplanner*. **De Smet, G., Locker, J. et al.**
20. *SYMPHONY*. **Ladanyi, L., Ralphs, T., Guzelsoy, M. y Mahajan, A.**
21. *An open source Spreadsheet Solver for Vehicle Routing Problems*. **Erdogan, G.** 2017, Computers & Operations Research, Volume 84, págs 62-72
22. *Diseño de un modelo de optimización de rutas de transporte*. **Bermeo, E. A. y Sotero, J. H.** 2009, El hombre y la Máquina, 32, págs. 52-67
23. *Good Practice Guide on Urban Freight Transport*. Allen, J., Thorne, G. and Browne, M. 2017, BESTUFS.
24. *Innovative solutions for sustainable mobility of people in suburban city districts and emission free freight logistics in urban centers*. CIVITAS ECCENTRIC. 2016
25. *Urban Research – Policy – Practice*. The European Urban Knowledge Network.

26. *City Logistics. Network Modelling and Intelligent Transport Systems*. Taniguchi, E. et al. 2002, EJTIR,2, págs 57-58
27. *El futuro de un transporte de mercancías y una logística sostenible*. Institute for Transport Studies, Universidad de Leeds. 2010. Parlamento Europeo
28. *Acuerdo de París*. Naciones Unidas. 2015
29. *Conferencia de París sobre el clima (COP21)*. Naciones Unidas. 2015
30. *Protocolo de Kyoto de la convención marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático*. Naciones Unidas. 2015
31. *Informe Anual 2017 del Observatorio del Transporte y la Logística en España*. División de Estudios y Tecnología del Transporte de la Secretaría General del Transporte. 2018.
32. *Reducción de las emisiones de carbono y la energía renovable*. Morales, M. y Pacheco, H.
33. *Global EV Outlook 2018*. International Energy Agency. 2018.
34. *Boletín Mensual de Energía Eléctrica*. Red Eléctrica de España. 2018. Disponible en: http://www.ree.es/sites/default/files/11_PUBLICACIONES/Documentos/ree-julio-2018.pdf
35. *El vehículo eléctrico y la reducción del ruido ambiente en ciudades*. Barti, R. 2016, EuroRegio2016.
36. *Estos son los 3800 puntos de recarga donde puedes cargar tu coche o moto eléctrica en España y Portugal*. Lacort, J. Xataka.com. 2018. Disponible en: <https://www.xataka.com/automovil/estos-son-los-3-800-puntos-de-recarga-donde-puedes-cargar-tu-coche-electrico-en-espana-y-portugal>
37. Norway. European Alternative Fuels Observatory. Eafo.eu. Disponible en: <http://www.eafo.eu/content/norway>
38. *Incentives for promoting Battery Electric Vehicle (BEV) adoption in Norway*. Bjerkan, K. Y., Norbech, T. T. y Nordtomme M.E. 2016, Transportation Research Part D: Transport and Environment, 43, págs 169-180
39. *Eficiencia energética y frenado regenerativo*. Dirección de Ingeniería e Innovación Subdirección de Innovación y Desarrollo Tecnológico. 2018. ADIF
40. *Nissan ENV 200 | Información y puntos de recarga del coche eléctrico*. Conducetuciudad.com. Disponible en: <https://www.conducetuciudad.com/es/vehiculos/coches-electricos/recarga-nissan-env-200>
41. *Peajes Electricos*. EDP Energía. 2018. Disponible en: <http://www.edpenergia.es/recursosdep/doc/portal-clientes/20130827/precios/tarifas-electricas-para-empresas.pdf>
42. *Condiciones Particulares 3.0*. Iberdrola. 2018. Disponible en: https://www.iberdrola.es/webclipb/gc/prod/es_ES/planes/docs/plan_3_0.pdf
43. BOE núm. 312, de 29 de diciembre de 2017, páginas 53781- 53805.
44. *SEUR Repartidor/a Salaries in España*. Indeed.es. Disponible en: <https://www.indeed.es/salaries/Repartidor/a-Salaries-at-Seur>
45. *Bases y tipos de cotización*. 2018, Seguridad Social. Disponible en: <http://www.seg-social.es/wps/portal/wss/internet/Trabajadores/CotizacionRecaudacionTrabajadores/36537>
46. *Personalized Map Company*. Mymaps.com. Disponible en: <http://www.mymaps.com>
47. *Convertir coordenadas Geográficas a UTM*. Franspc.com. Disponible en: <http://www.franzpc.com/apps/conversor-coordenadas-geograficas-utm.html>
48. *La Z-40 reduce un 30% el tráfico de vehículos de paso por Zaragoza*. Valiente, M. 2009, El Periodico de Aragón

49. *Regiones urbanas Europa*. **Wékel, J.** 1997, Revista Urbanismo Coam, 32, págs. 62-69
50. *Electric Vehicle Outlook 2018*. Morsy S. 2018, BloombergNEF
51. *Resistencia a la Rodadura: pruebas de laboratorio*. Amtrialhlon.com. Disponible en: <http://www.amtrialhlon.com/2009/07/resistencia-la-rodadura-pruebas-de.html>
52. *MAN TGE, la primera de la familia*. Encamion.com. 2016. Disponible en: <https://www.encamion.com/articulo/novedad/MAN/TGE/nueva/furgoneta/carga/primer-a/volkswagen/crafter/plataforma/camion/encamion>
53. *PART, consejos aerodinámicos para el transporte de carretera*. Álvarez, S. 2009, Diario motor. Disponible en: <https://www.diariomotor.com/2009/12/10/part-consejos-aerodinamicos-para-el-transporte-de-carretera/>

ÍNDICE FIGURAS

Figura 1. Periodos según horario	17
Figura 2. Mapa superficie Zaragoza	25
Figura 3. Distribución de puntos escenario A1	26
Figura 4. Distribución de puntos escenario A2	26
Figura 5. Mapa superficie Berlín	29
Figura 6. Conexiones Berlín.....	29
Figura 7. Distribución de puntos escenario B1	29
Figura 8. Distribución de puntos escenario B2	29
Figura 9. Distribuciones de las distintas opciones estudiadas escenario A1	34
Figura 10. Distribuciones de las distintas opciones estudiadas escenario A2	36
Figura 11. Distribuciones de las distintas opciones estudiadas escenario B1	37
Figura 12. Distribuciones de las distintas opciones estudiadas escenario B2	38
Figura 13. Comparación consumos entre VP y VG	40
Figura 14. Curva Fuerza-Velocidad vehículo pequeño.....	54
Figura 15. Curva Velocidad-Tiempo para el cálculo de la batería.....	55
Figura 16. Curva descarga batería vehículo pequeño.....	56
Figura 17. Curva Fuerza-Velocidad vehículo grande.....	58
Figura 18. Parámetros de salida VRP Solver	60
Figura 19. Barra del menú del VRP Spreadsheet Solver	61
Figura 20. Ejemplo ruta realizada por los vehículos	65

ÍNDICE TABLAS

Tabla 1. Furgonetas 100% eléctricas disponibles en el mercado español actual.....	11
Tabla 2. Tarifas 3.0a según periodo	17
Tabla 3. Ejemplo de tabla distribución de la herramienta desarrollada.....	23
Tabla 4. Puntos de reparto para el escenario A (A1 y A2)	26
Tabla 5. Cálculo velocidad cruce Zaragoza	27
Tabla 6. Cálculo factor “k” Zaragoza	27
Tabla 7. Consumos vehículo pequeño en función del número de paradas para v=30 km/h	28
Tabla 8. Consumos vehículo grande en función del número de paradas para v=30 km/h	28
Tabla 9. Puntos de reparto para el escenario B (B1 y B2).....	30
Tabla 10. Cálculo velocidad cruce Berlín	30
Tabla 11. Cálculo factor “k” Berlín	30
Tabla 12. Consumos vehículo pequeño en función del número de paradas para v=45 km/h	31
Tabla 13. Consumos vehículo grande en función del número de paradas para v=45 km/h	31
Tabla 14. Resultados distribuciones escenario A1.....	32
Tabla 15. Resultados funciones objetivo escenario A1.....	33
Tabla 16. Resultados distribuciones escenario A2.....	35
Tabla 17. Resultados funciones objetivo escenario A2.....	35
Tabla 18. Resultados distribuciones escenario B1.....	36
Tabla 19. Resultados funciones objetivo escenario B1.....	37
Tabla 20. Resultados distribuciones escenario B2.....	38
Tabla 21. Resultados funciones objetivo escenario B2.....	38
Tabla 22. Comparación función objetivo 2	41
Tabla 23. Comparación entre opción “2, 5, 6” y “3, 4, 5”	41
Tabla 24. Influencia del precio de la electricidad en los diferentes escenarios	42
Tabla 25. Influencia de la recuperación de energía por el efecto del freno regenerativo	25

Tabla 26. Influencia de la velocidad crucero.....	43
Tabla 27. Comparativa del consumo de energía según opción de distribución	43
Tabla 28. Características del vehículo pequeño	53
Tabla 29. Resistencias a vencer por el VP y potencia mínima requerida	54
Tabla 30. Características dimensionamiento de la batería del vehículo pequeño.....	55
Tabla 31. Características de la batería y consumo del vehículo pequeño	56
Tabla 32. Características del vehículo grande.....	57
Tabla 33. Resistencias a vencer por el VG y potencia mínima requerida	57
Tabla 34. Características dimensionamiento de la batería del vehículo grande	58
Tabla 35. Características de la batería y consumo del vehículo grande	59
Tabla 36. Parámetros de estudio	63
Tabla 37. Cuadro resumen de la herramienta desarrollada	63
Tabla 38. Coordenadas geográficas	63
Tabla 39. Coordenadas UTM.....	63
Tabla 40. Coordenadas UTM después de aplicar factor “k”	63
Tabla 41. Matriz de distancias	64
Tabla 42. Ejemplo distribución (1/10) sentido A	64
Tabla 43. Ejemplo distribución (1/10) sentido B.....	65
Tabla 44. Distribución detallada opción 1, 8 y 9 (Escenario A1 y sentido A).....	66
Tabla 45. Distribución detallada opción 1, 8 y 9 (Escenario A1 y sentido B)	66
Tabla 46. Distribución detallada opción 2, 6 y 7 (Escenario A1 y sentido A).....	66
Tabla 47. Distribución detallada opción 2, 6 y 7 (Escenario A1 y sentido B)	67
Tabla 48. Distribución detallada opción 3, 4 y 5 (Escenario A1 y sentido A).....	67
Tabla 49. Distribución detallada opción 3, 4 y 5 (Escenario A1 y sentido B)	67
Tabla 50. Distribución detallada opción 10 (Escenario A1 y sentido A)	68
Tabla 51. Distribución detallada opción 10 (Escenario A1 y sentido B).....	68
Tabla 52. Distribución detallada opción 1, 8 y 9 (Escenario A2 y sentido A).....	68
Tabla 53. Distribución detallada opción 1, 8 y 9 (Escenario A2 y sentido B)	69
Tabla 54. Distribución detallada opción 2, 3, 4, 5, 6 y 7 (Escenario A2 y sentido A)	69
Tabla 55. Distribución detallada opción 2, 3, 4, 5, 6 y 7 (Escenario A2 y sentido B)	69
Tabla 56. Distribución detallada opción 10 (Escenario A2 y sentido A)	70

Tabla 57. Distribución detallada opción 10 (Escenario A2 y sentido B).....	70
Tabla 58. Distribución detallada opción 1, 8 y 9 (Escenario B1 y sentido A)	70
Tabla 59. Distribución detallada opción 1, 8 y 9 (Escenario B1 y sentido B)	71
Tabla 60. Distribución detallada opción 2, 3, 4, 5, 6 y 7 (Escenario B1 y sentido A)	71
Tabla 61. Distribución detallada opción 2, 3, 4, 5, 6 y 7 (Escenario B1 y sentido B)	71
Tabla 62. Distribución detallada opción 10 (Escenario B1 y sentido A).....	72
Tabla 63. Distribución detallada opción 10 (Escenario B1 y sentido B).....	72
Tabla 64. Distribución detallada opción 1, 8 y 9 (Escenario B2 y sentido A)	72
Tabla 65. Distribución detallada opción 1, 8 y 9 (Escenario B2 y sentido B)	73
Tabla 66. Distribución detallada opción 2, 3, 4, 5, 6 y 7 (Escenario B2 y sentido A)	73
Tabla 67. Distribución detallada opción 2, 3, 4, 5, 6 y 7 (Escenario B2 y sentido B)	73
Tabla 68. Distribución detallada opción 10 (Escenario B2 y sentido A).....	74
Tabla 69. Distribución detallada opción 10 (Escenario B2 y sentido B).....	74

ANEXO 1: DISEÑO DE LOS VEHÍCULOS

El diseño y dimensionamiento tanto del vehículo pequeño como del vehículo grande se ha realizado mediante el software desarrollado por el Grupo de I+D de Transportes (departamento de Ingeniería Mecánica) de la Universidad de Zaragoza llamado “Automóviles eléctricos v1.0”.

Las características que afectan únicamente a la estabilidad del vehículo han sido obviadas ya que no tiene influencia en el dimensionamiento de la batería. A pesar de ello algunas características que afectan a la estabilidad también afecta a las prestaciones por lo que se detallarán en sus respectivos cálculos.

1. VEHÍCULO PEQUEÑO

Este vehículo es de dimensiones reducidas similares a modelos como Nissan eNV-200 o Citroën Berlingo Electric. Las dimensiones del vehículo serán 4380 mm de largo, 1755 mm de alto y 1858 mm de ancho. Además su MMA es 2250 kg. Además, deberá poder transportar una carga útil de 800 kg. A continuación se detalla el diseño del vehículo.

1.1 CALCULO DE RESISTENCIA. POTENCIA NECESARIA

En primer lugar se va a calcular la potencia mínima que debe de tener el motor para poder circular bajo las características que se definen en la tabla 28. Para realizar este dimensionamiento la masa del vehículo será su MMA (2250kg) y la velocidad del vehículo 123 km/h¹² (velocidad máxima del vehículo) con una pendiente del 0%. Estas características se ajustan a las necesidades para los que ha sido diseñado, la distribución urbana de mercancías.

Tabla 28. Características del vehículo pequeño

Peso del vehículo [kg]	2250
Coeficiente rodadura¹³	0.0077
Coeficiente aerodinámico¹⁴	0.33
Pendiente a superar [%]	0
Alto del vehículo [mm]	1755
Ancho del vehículo [mm]	1858
Velocidad del vehículo [km/h]	123
Rendimiento de la transmisión	0.8

Las resistencias que se obtienen con estas características y por lo tanto la potencia mínima necesaria serían las reflejadas en la tabla 29. Estos cálculos han sido realizados mediante el software comentado. Lógicamente la potencia que finalmente tendrá el motor será superior a esta potencia mínima ya que el vehículo debe de comportarse de forma ágil.

¹² Se ha establecido una velocidad máxima de 123 km/h porque a pesar de ser un vehículo diseñado para la distribución urbana de mercancía esto no significa que no pueda hacer uso de vías interurbanas o circunvalaciones en las que la velocidad a la que tiene que circular el vehículo es mayor.

¹³ El coeficiente de rodadura depende de las características de los neumáticos [51]

¹⁴ El cálculo del coeficiente aerodinámico (Cx) se realiza de manera experimental y depende de la carrozada del vehículo. Se ha tomado ese Cx por similitud de características de altura y anchura con vehículos que actualmente están en el mercado como el Nissan eNV200 o MAN TGE [52]

Tabla 29. Resistencias a vencer por el VP y potencia mínima requerida

Resistencia a la rodadura [kg]	17.33
Resistencia a pendientes [kg]	0
Resistencia aerodinámica [kg]	66.75
Resistencia total [kg]	84.07
Potencia mínima necesaria [CV]	47.88

Se observa como la resistencia aerodinámica es mucho mayor a la de rodadura. Esto es debido a que la resistencia aerodinámica depende de la velocidad de forma cuadrática. Así pues, para velocidades en torno a los 50 km/h, la resistencia aerodinámica empieza a predominar sobre las demás resistencias

1.2 RELACIÓN DE TRANSMISIÓN

Respecto a la relación de transmisión tendrá una única marcha a parte de la marcha atrás, que se obtiene a través de un cambio de polaridad, por lo que no dispone de caja de cambios. Esto influye en la curva del motor que se detalla en el siguiente apartado.

1.3 CURVA DE RESISTENCIA AL AVANCE. MÁXIMA PENDIENTE SUPERABLE

Para el cálculo de fuerza-velocidad, el criterio principal de cálculo es que el motor debe de ser capaz de vencer la resistencia calculada a velocidad máxima (calculado en el apartado 1.1 de este mismo anexo).

Teniendo en cuenta que se trata de un motor eléctrico, las resistencias que debe de vencer y que no dispone de caja de cambios, la curva es la que se muestra en la figura 14.

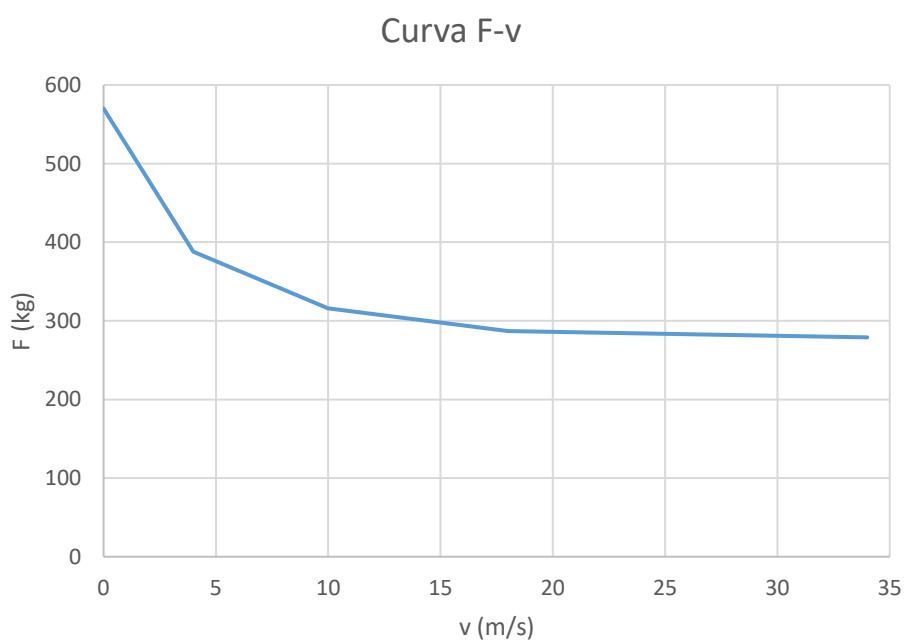


Figura 14. Curva Fuerza-Velocidad vehículo pequeño

1.4 DIMENSIONAMIENTO ENERGÉTICO. BATERÍAS

Por último se tienen en cuenta los parámetros que aparecen en la tabla 30. La batería se ha dimensionado de manera que el vehículo tenga una autonomía de 200 km a una velocidad de 50 km/h y pendiente del 0%.

Tabla 30. Características dimensionamiento de la batería del vehículo pequeño

Peso del vehículo [kg]	2250
Coeficiente rodadura	0.0077
Coeficiente aerodinámico	0.3
Pendiente a superar [%]	0
Rendimiento de la transmisión	0.8
Rendimiento del motor eléctrico	0.85
Autonomía [km]	200
Alto del vehículo [mm]	1755
Ancho del vehículo [mm]	1858
Tensión del motor eléctrico [V]	72
Densidad energía batería [Wh/kg]	160

En las figuras 15 y 16 se muestran respectivamente el ciclo de funcionamiento y curva de carga-capacidad de la batería. Respecto a la curva de descarga de la batería muestra la capacidad de la batería en función del tiempo de descarga, siendo C_5 un ritmo en el cual la batería se descarga por completo en 5 horas. De acuerdo a la ley, la batería tiene que tener el 100% de capacidad a un ritmo de descarga del $0.2C_5$.

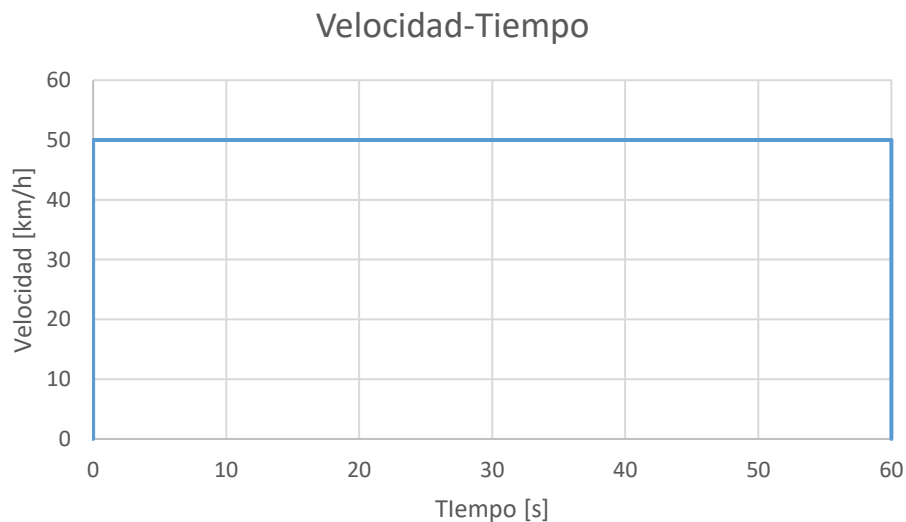


Figura 15. Ciclo Velocidad-Tiempo para el cálculo de la batería

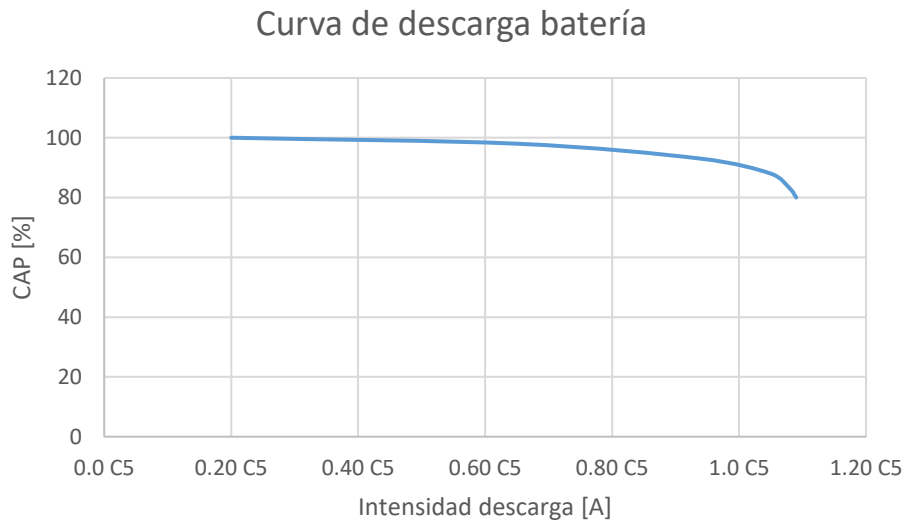


Figura 16. Curva descarga batería

Así pues finalmente se obtiene una batería que presenta las características que se muestran en la tabla 31. Comparando estos datos obtenidos con los de vehículos de similares características en el mercado, tanto los consumos como la capacidad de la batería y autonomía es bastante similar.

Tabla 31. Características de la batería y consumo del vehículo pequeño

Peso batería [kg]	160.45
Energía capaz de ceder por la batería [kWh]	22.18
Consumo específico [Wh/t*km]	49.29

1.5 CARGA MÁXIMA

Por último se va a calcular la carga máxima admisible una vez se conocen los pesos de los distintos componentes del vehículo:

$$P_{CARGA\ MAX} = P_{MMA} - P_{BATERIA} - P_{ESTRUCTURA} - P_{MOTOR} - P_{CONDUCTOR}$$

$$P_{CARGA\ MAX} = 2250 - 160.45 - 800 - 300 - 75$$

$$P_{CARGA\ MAX} = 914.55\ kg$$

2. VEHÍCULO GRANDE

Este vehículo a diferencia del vehículo pequeño presenta unas dimensiones tanto longitudinalmente (6990 mm) como la superficie frontal (2200 mm de alto y 1955 mm de ancho), lo que tendrá efectos negativos en la resistencia aerodinámica. El vehículo se ha diseñado para poder transportar una carga útil cercana a las 3 toneladas con una MMA de 5200 kg. A continuación se detalla paso a paso el diseño de este vehículo.

2.1 CALCULO DE RESISTENCIA. POTENCIA NECESARIA

De la misma forma que para el vehículo pequeño, se definen las condiciones de diseño del motor para calcular las resistencias que debe de vencer el vehículo y posteriormente la potencia mínima necesaria. En este caso el vehículo debe poder circular a 123 km/h¹⁵ en una pendiente del 0% con un peso igual a su MMA. En la tabla 32 y 33 se detallan, respectivamente, todas las características que influyen en el cálculo de las resistencias y las resistencias a vencer incluyendo la potencia mínima necesaria.

Tabla 32. Características del vehículo grande

Peso del vehículo [kg]	5200
Coeficiente rodadura	0.0077
Coeficiente aerodinámico	0.6
Pendiente a superar [%]	0
Alto del vehículo [mm]	2200
Ancho del vehículo [mm]	1955
Velocidad del vehículo [km/h]	123
Rendimiento de la transmisión	0.8

Tabla 33. Resistencias a vencer por el VG y potencia mínima requerida

Resistencia a la rodadura [kg]	40.04
Resistencia a pendientes [kg]	0
Resistencia aerodinámica [kg]	163.35
Resistencia total [kg]	203.38
Potencia mínima necesaria [CV]	115.83

El coeficiente aerodinámico en este tipo de vehículos debido a su longitud y a la gran superficie frontal prácticamente recta que ocupa el coeficiente aerodinámico es mucho mayor que en el caso del vehículo pequeño [53].

2.2 RELACIÓN DE TRANSMISIÓN

De la misma forma que el vehículo pequeño, este vehículo no presenta una caja de cambios ya que se trata de un motor eléctrico con la curva característica que se detalla en el apartado 2.3

2.3 CURVA DE RESISTENCIA AL AVANCE. MÁXIMA PENDIENTE SUPERABLE

La curva del motor para este vehículo tiene que ser suficiente como para vencer las resistencias calculadas en el apartado 2.1. Así pues, la curva del motor es similar a la del vehículo pequeño pero de mayor potencia como se observa en la figura 17.

¹⁵ En circunstancias normales, el vehículo nunca va a circular a esa velocidad pero el motor tiene que ser capaz de alcanzar esa velocidad para evitar que a una velocidad legalmente posible el vehículo no tenga potencia suficiente, es decir, hay una sobredimensión en la potencia del motor.

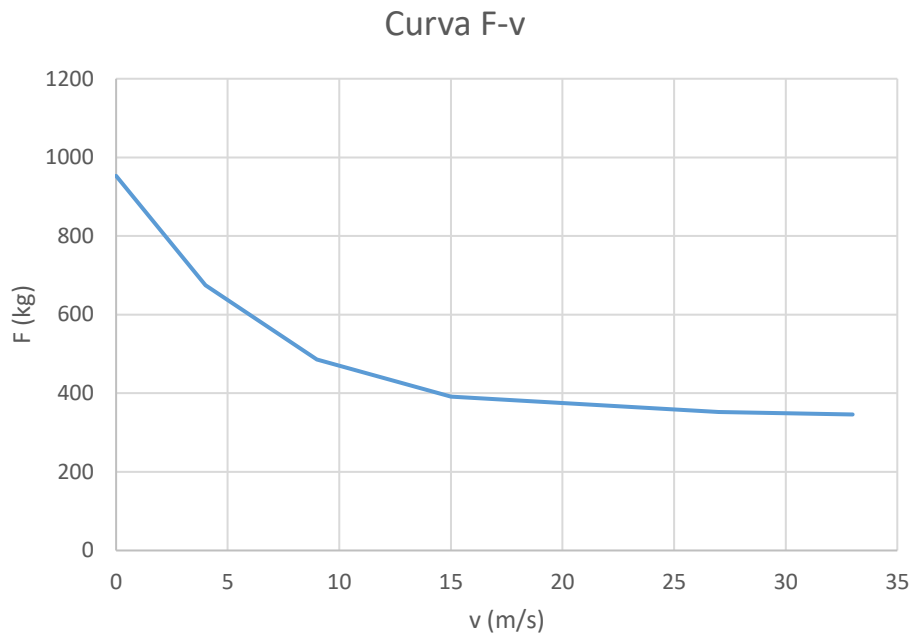


Figura 17. Curva Fuerza-Velocidad vehículo grande

2.4 DIMENSIONAMIENTO ENERGÉTICO. BATERÍAS

De la misma forma que calculado en el apartado anterior, la batería se ha dimensionado de manera que el vehículo tenga una autonomía de 150 km a una velocidad de 50 km/h y pendiente del 0%. Para ello es necesario definir los parámetros recogidos en la tabla 34.

Como se puede observar el vehículo tiene una autonomía de 50km menos que el vehículo pequeño. Si tuvieran la misma autonomía la batería del vehículo debería de ser de una capacidad muy grande por lo que no se podría cargar el vehículo en un tiempo práctico. La curva de la batería es la misma que la mostrada con el vehículo pequeño (figura 16)

Tabla 34. Características dimensionamiento de la batería del vehículo grande

Peso del vehículo [kg]	5200
Coeficiente rodadura	0.0077
Coeficiente aerodinámico	0.6
Pendiente a superar [%]	0
Rendimiento de la transmisión	0.8
Rendimiento del motor eléctrico	0.85
Autonomía [km]	150
Alto del vehículo [mm]	2200
Ancho del vehículo [mm]	1955
Tensión del motor eléctrico [V]	72
Densidad energía batería [Wh/kg]	160

Finalmente los detalles de la batería del vehículo grande son los que se muestran en la tabla 35. Cabe comentar que aunque el consumo específico entre el vehículo grande y el pequeño para la pendiente y velocidad especificada es muy parecido, el vehículo grande pesa 3 toneladas más por lo que su consumo se duplica.

Tabla 35. Características de la batería y consumo del vehículo grande

Peso batería [kg]	290.31
Energía capaz de ceder por la batería [kWh]	39.24
Consumo específico [Wh/t*km]	50.38

2.5 CARGA MÁXIMA

Una vez calculado el peso de las baterías y conociendo el resto de los pesos del vehículo, la carga máxima que podrá transportar este vehículo será la que se refleja a continuación.

$$P_{CARGA\ MAX} = P_{MMA} - P_{BATERIA} - P_{ESTRUCTURA} - P_{MOTOR} - P_{CONDUCTOR}$$

$$P_{CARGA\ MAX} = 5200 - 290.31 - 1500 - 400 - 75$$

$$P_{CARGA\ MAX} = 2934.69\ kg$$

ANEXO 2: VRP SPREADSHEET SOLVER

Para realizar el cálculo de la ruta más óptima para una serie de puntos con una flota determinada en función de la distancia se emplea el siguiente Solver: “VRP Spreadsheet Solver” desarrollado por Günes Erdogan de la Universidad de Bath.

A continuación se va a explicar el uso que se ha hecho en el presente trabajo de este Solver. Como se verá a continuación el alcance de esta herramienta va más allá del uso que se hace en este proyecto.

1. LIMITACIONES DE LA HERRAMIENTA SOLVER

A continuación se van a definir las limitaciones del Solver desarrollado por Erdogan¹⁶:

- El número de clientes está limitado a 200 aunque pueda aumentarse modificando el código siempre y cuando se emplee un Solver externo que permita procesar tal cantidad de datos.
- Los costes asociados a la ruta consta de una parte fija y otra variable en función de la distancia (no se ha usado en el presente proyecto).
- Las distancias y duraciones de los trayectos están fijadas de antemano.
- No se permiten repartos de carga parciales en ninguno de los puntos. El vehículo debe depositar toda la carga que debe de repartir en los puntos no estando permitido un servicio parcial.

2. PARÁMETROS DE ENTRADA

Los parámetros de entrada son aquellos parámetros que se deben introducir en el Solver para obtener una solución. Así pues, los parámetros de entrada son:

- Nube de puntos (incluido el punto de partida y final de los vehículos).
- Cantidad a recoger/repartir en cada punto.
- Vehículos disponibles para realizar la distribución junto con su autonomía y capacidad.

3. PARÁMETROS DE SALIDA

Los parámetros de salida que se obtiene es una pantalla con tantas tablas como vehículos halla implicados en la operativa en el cual se incluye la secuencia de vehículos implicados, la distancia recorrida, la cantidad de material transportada y en caso de añadir los datos necesarios, hora de distribución y beneficio total (no se ha hecho uso en el presente proyecto de estas dos últimas características). En la figura 18 se muestra una tabla a modo de ejemplo.

Stop count	Location name	Distance travelled	Driving time	Arrival time	Departure time	Working time	Profit collected	Load
0	Depot	0,00	0:00		08:00	0:00	0	40
1	Customer 15	45,00	0:54	08:54	08:54	0:54	0	30
2	Customer 20	67,20	1:21	09:21	09:21	1:21	0	20
3	Customer 4	90,61	1:49	09:49	09:49	1:49	0	10
4	Customer 17	120,63	2:25	10:25	10:25	2:25	0	0
5	Depot	165,63	3:19	11:19		3:19	0	0
6								

Figura 18. Parámetros de salida VRP Solver

¹⁶ Estas limitaciones no son las mismas que las limitaciones de la herramienta desarrollada en el proyecto ya que esta última se adapta al alcance del mismo

4. USO DEL SOLVER

En este apartado se va a detallar el uso de la herramienta. Las pestañas se van rellenando de manera ordenada tal cual aparecen en la figura 19 mostrada a continuación.¹⁷

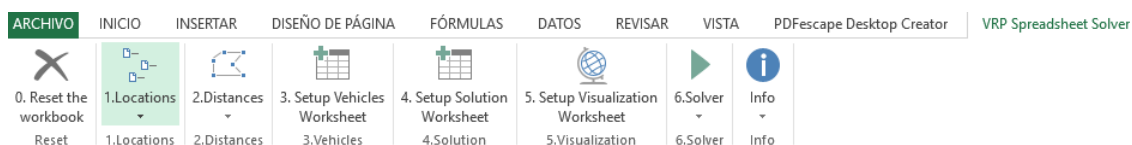


Figura 19. Barra del menú del VRP Spreadsheet Solver

- En primer lugar se introduce toda la información relevante acerca de la definición del problema en la pestaña “VRP Solver Console”. En ella se detalla información como:
 - El número de puntos de partida (1 punto de partida este proyecto).
 - El número de puntos de reparto. Como comentado está limitado a 200 sin incluir los puntos de partida (en el presente proyecto son 20 puntos + punto de partida).
 - El tipo de distancia entre puntos a distinguir entre:
 - Entrada manual: las distancias se introducen manualmente.
 - Distancia euclídea: es la distancia “ordinaria” entre dos puntos, es decir, la mínima distancia entre dos puntos. Opción seleccionada en el proyecto.
 - Distancia euclídea circular: es la distancia euclídea redondeado al número entero más cercano.
 - Distancia Manhattan: es una forma de medir la distancia en la cual solo se puede hacer un recorrido formando ángulos rectos.
 - Distancia vuelo de pájaro: es la distancia en línea recta entre dos puntos pero teniendo en cuenta la forma esférica de la tierra.
 - Distancia de conducción con la ayuda de Bring Maps.
 - El tipo de ruta en caso de emplear distancias reales Bring Maps.
 - Número de tipos de vehículos (2 vehículos distintos).
 - Modo de procesamiento de las ventanas temporales (no se han considerado).
 - Si los vehículos deben volver al punto de partida después de distribuir el material o no (sí).
 - El tiempo de procesamiento para el cálculo de la distribución óptima (120 segundos).
- En la siguiente pestaña “1. Locations” se definen las coordenadas de los puntos así como las ventanas temporales si las hubiera. Además se especifica la cantidad de material a repartir desde el punto de salida y la cantidad de material que se debe de repartir en cada punto. Existe la posibilidad de importar las coordenadas a través de Bing Maps.
- En la pestaña “2. Distances” se generan todas las distancias relativas entre los distintos puntos introducidos en la pestaña anterior. Estos datos serán luego utilizados por el Solver para calcular la ruta óptima.
- Respecto a la pestaña “3. Setup Vehicles Worksheet” se introducen los datos relacionados con los tipos de vehículos. Se introducen los nombres de los vehículos, capacidad, coste, distancia máxima que pueden recorrer, hora en la que empieza la distribución de mercancía, limite horario de conducción, limite horario de trabajo y número de cada tipo de vehículo.

¹⁷ Entre paréntesis se añade la configuración seleccionada en el proyecto

- La pestaña “4. Setup Solution Worksheet” simplemente configura la pantalla sobre la que el Solver trabajará para dar la solución óptima.
- La pestaña “5. Setup Visualization Worksheet” se utiliza únicamente en el caso de que los puntos se importen de Bing Maps.
- Por último la pestaña “6. Solver” tiene varias opciones. A la hora de buscar una solución existen varias opciones:
 - Introducir manualmente todos o alguno de los puntos por los que se quiere que pase un determinado vehículo.
 - Ejecutar el Solver que automáticamente busca la mejor solución al problema planteado (tanto si has introducido manualmente algún punto como si no).
 - Existe una opción que permite chequear la viabilidad de una solución propuesta con respecto a los criterios que se establecieron con anterioridad.
 - Se puede utilizar un Solver externo en lugar de utilizar el Solver del propio Excel. Esta opción será imprescindible cuando el escenario planteado tenga más de 200 puntos y por lo tanto sea necesario un motor de cálculo más potente.

ANEXO 3: EXCEL APLICACIÓN PARA EL ESTUDIO DE LAS FUNCIONES OBJETIVO

En el siguiente anexo se muestran algunas imágenes de la Excel desarrollada a través de la cual se determinan los cálculos. En primer lugar en la página de resumen se puede observar las variables del problema (tabla 36), así como el cuadro resumen (tabla 37) donde se reporta

Tabla 36. Parámetros de estudio

Coste electricidad [€/kWh]	0.16337
Velocidad Crucero [km/h]	30
Coste Personal Horario VP [€/h]	8.88375
Coste Personal Horario VG [€/h]	8.88375
Tiempo Parada VP [h]	0.166
Tiempo Parada VG [h]	0.166
Freno Regenerativo	0.01
Constante "k"	1.89

automáticamente todos los datos después de completar las distintas rutas.

Tabla 37. Cuadro resumen de la herramienta desarrollada

Opción	Vehículo		Distancia VG [km]	Distancia VP [km]	Distancia Total [km]	Nº Paradas VG	Nº Paradas VP	Energía Consumida [kWh]	Energía Consumida con Freno Regenerativo [kWh]	Tiempo consumido [min]	F. OBJ f1 [€]	F. OBJ f2 [€]
	Grande	Pequeño										
1	1	3	30.13	74.59	104.72	8.00	12.00	8.92	8.83	409	1.44	61.95
2	2	1	67.49	25.34	92.83	16.00	4.00	10.53	10.42	385	1.70	58.69
3	3	0	91.21	0.00	91.21	20.00	0.00	11.49	11.37	382	1.86	58.36
4	3	0	91.21	0.00	91.21	20.00	0.00	11.49	11.37	382	1.86	58.36
5	3	0	91.21	0.00	91.21	20.00	0.00	11.49	11.37	382	1.86	58.36
6	2	1	67.49	25.34	92.83	16.00	4.00	10.53	10.42	385	1.70	58.69
7	2	1	67.49	25.34	92.83	16.00	4.00	10.53	10.42	385	1.70	58.69
8	1	3	30.13	74.59	104.72	8.00	12.00	8.92	8.83	409	1.44	61.95
9	1	3	30.13	74.59	104.72	8.00	12.00	8.92	8.83	409	1.44	61.95
10	0	5	0.00	116.43	116.43	0.00	20.00	7.80	7.72	432	1.26	65.23

Respecto a las hojas donde se detalla cada distribución aparecen las tablas con las coordenadas geográficas (tabla 38), coordenadas UTM (tabla 39) y coordenadas UTM después de aplicar el factor k (tabla 40)

Tabla 38. Coordenadas geográficas

Punto	Coordenadas Geográficas	
	Latitud	Longitud
1	41.63690	-0.88720
2	41.67175	-0.87615
3	41.66098	-0.90242
4	41.66008	-0.85710
5	41.67137	-0.84423
6	41.65675	-0.93624
7	41.64084	-0.93898
8	41.62339	-0.91993
9	41.62083	-0.87118
10	41.63725	-0.83925
11	41.62532	-0.95752
12	41.64405	-0.86603
13	41.67137	-0.89212
14	41.61159	-0.89401
15	41.68034	-0.92010
16	41.66009	-0.87512
17	41.64572	-0.91529
18	41.61403	-0.92559
19	41.63520	-0.85298
20	41.65303	-0.88336
21	41.66803	-0.82406

Tabla 39. Coordenadas UTM

Punto	Coordenadas UTM	
	X [km]	Y [km]
1	675.9730	4611.6191
2	676.7980	4615.5112
3	674.6402	4614.2618
4	678.4162	4614.2547
5	679.4564	4615.5350
6	671.8355	4613.7241
7	671.6496	4611.9522
8	673.2830	4610.0528
9	677.3514	4609.8677
10	679.9660	4611.7570
11	670.1463	4610.1922
12	677.7167	4612.4564
13	675.4696	4615.4363
14	675.4744	4608.7951
15	673.1162	4616.3757
16	676.9157	4614.2187
17	673.6096	4612.5415
18	672.8365	4609.0022
19	678.8280	4611.5008
20	676.2489	4613.4179
21	681.1449	4615.2064

Tabla 40. Coordenadas UTM después de aplicar factor "k"

Punto	Coordenadas UTM	
	X [km]	Y [km]
1	1277.58897	8715.96010
2	1279.14822	8723.31617
3	1275.06998	8720.95480
4	1282.20662	8720.94138
5	1284.17260	8723.36115
6	1269.76910	8719.93855
7	1269.41774	8716.58966
8	1272.50487	8712.99979
9	1280.19415	8712.64995
10	1285.13574	8716.22073
11	1266.57651	8713.26326
12	1280.88456	8717.54260
13	1276.63754	8723.17461
14	1276.64662	8710.62274
15	1272.18962	8724.95007
16	1279.37067	8720.87334
17	1273.12214	8717.70344
18	1271.66099	8711.01416
19	1282.98492	8715.73651
20	1278.11042	8719.35983
21	1287.36386	8722.74010

Automáticamente se genera una matriz de distancias como la que se muestra en la tabla 41

Matriz Distancias																					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
1	0.0	7.5	5.6	6.8	9.9	8.8	8.2	5.9	4.2	7.6	11.3	3.7	7.3	5.4	10.5	5.2	4.8	7.7	5.4	3.4	11.9
2	7.5	0.0	4.7	3.9	3.9	10.0	11.8	12.3	10.7	9.3	16.1	6.0	2.5	12.9	7.1	2.5	8.2	14.4	8.5	4.1	8.2
3	5.6	4.7	0.0	7.1	9.4	5.4	7.1	8.4	9.8	11.1	11.5	6.7	2.7	10.5	4.9	4.3	3.8	10.5	9.5	3.4	12.4
4	6.8	3.9	7.1	0.0	3.1	12.5	13.5	12.5	8.5	5.6	17.4	3.6	6.0	11.7	10.8	2.8	9.6	14.5	5.3	4.4	5.5
5	9.9	5.0	9.4	3.1	0.0	14.8	16.2	15.6	11.4	7.2	20.3	6.7	7.5	14.8	12.1	5.4	12.4	17.6	7.7	7.3	3.3
6	8.8	10.0	5.4	12.5	14.8	0.0	3.4	7.5	12.7	15.8	7.4	11.4	7.6	11.6	5.6	9.6	4.0	9.1	13.9	8.4	17.8
7	8.2	11.8	7.1	13.5	16.2	3.4	0.0	4.7	11.5	15.7	4.4	11.5	9.8	9.4	8.8	10.8	3.9	6.0	13.6	9.1	19.0
8	5.9	12.3	8.4	12.5	15.6	7.5	4.7	0.0	7.7	13.0	5.9	9.5	11.0	4.8	12.0	10.4	4.7	2.2	10.8	8.5	17.8
9	4.2	10.7	9.8	8.5	11.4	12.7	11.5	7.7	0.0	6.1	13.6	4.9	11.1	4.1	14.7	8.3	8.7	8.7	4.2	7.0	12.4
10	7.6	9.3	11.1	5.6	7.2	15.8	15.7	13.0	6.1	0.0	18.8	4.5	11.0	10.2	15.6	7.4	12.1	14.4	2.2	7.7	6.9
11	11.3	16.1	11.5	17.4	20.3	7.4	4.4	5.9	13.6	18.8	0.0	14.9	14.1	10.4	13.0	14.9	7.9	5.6	16.6	13.0	22.8
12	3.7	6.0	6.7	3.6	6.7	11.4	11.5	9.5	4.9	4.5	14.9	0.0	7.1	8.1	11.4	3.7	7.8	11.3	2.8	3.3	8.3
13	7.3	2.5	2.7	6.0	7.5	7.6	9.8	11.0	11.1	11.0	14.1	7.1	0.0	12.6	4.8	3.6	6.5	13.1	9.8	4.1	10.7
14	5.4	12.9	10.5	11.7	14.8	11.6	9.4	4.8	4.1	10.2	10.4	8.1	12.6	0.0	15.0	10.6	7.9	5.0	8.1	8.9	16.2
15	10.5	7.1	4.9	10.8	12.1	5.6	8.8	12.0	14.7	15.6	13.0	11.4	4.8	15.0	0.0	8.3	7.3	13.9	14.2	8.1	15.3
16	5.2	2.5	4.3	2.8	5.4	9.6	10.8	10.4	8.3	7.4	14.9	3.7	3.6	10.6	8.3	0.0	7.0	12.5	6.3	2.0	8.2
17	4.8	8.2	3.8	9.6	12.4	4.0	3.9	4.7	8.7	12.1	7.9	7.8	6.5	7.9	7.3	7.0	0.0	6.8	10.1	5.3	15.1
18	7.7	14.4	10.5	14.5	17.6	9.1	6.0	2.2	8.7	14.4	5.6	11.3	13.1	5.0	13.9	12.5	6.8	0.0	12.3	10.5	19.6
19	5.4	8.5	9.5	5.3	7.7	13.9	13.6	10.8	4.2	2.2	16.6	2.8	9.8	8.1	14.2	6.3	10.1	12.3	0.0	6.1	8.3
20	3.4	4.1	3.4	4.4	7.3	8.4	9.1	8.5	7.0	7.7	13.0	3.3	4.1	8.9	8.1	2.0	5.3	10.5	6.1	0.0	9.9
21	11.9	8.2	12.4	5.5	3.3	17.8	19.0	17.8	12.4	6.9	22.8	8.3	10.7	16.2	15.3	8.2	15.1	19.6	8.3	9.9	0.0

Tabla 41. Matriz de distancias

Como comentado en el capítulo 3, tras introducir la ruta óptima en las celdas amarillas, se obtiene la distancia, número de paradas y consumo de energía, tabla 42 y 43, destacándose en verde automáticamente la mejor ruta.

Tabla 42. Ejemplo distribución (1/10) sentido A

SENTIDO A												DISTANCIA	Nº paradas	Consumo energia (KWh)	
VG	1	PTO	1	20	16	4	5	21	10	19	12	1	30.13	8	3.91
		DIST		3.44	1.97	2.84	3.12	3.25	6.89	2.20	2.77	3.66			
VP	1	PTO	1	8	18	14	9	1	1	1	1	1	21.34	4	1.47
		DIST		5.88	2.16	5.00	4.09	4.21	0.00	0.00	0.00	0.00			
VP	2	PTO	1	11	7	6	17	1	1	1	1	1	27.90	4	1.99
		DIST		11.34	4.37	3.37	4.03	4.79	0.00	0.00	0.00	0.00			
VP	3	PTO	1	2	13	15	3	1	1	1	1	1	25.34	4	1.74
		DIST		7.52	2.51	4.79	4.93	5.59	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0.00
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0.00
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0.00
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0.00
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0.00
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0.00
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0.00
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
TOTAL												104.72	20.00	9.12	

Tabla 43. Ejemplo distribución (1/10) sentido B

SENTIDO B												DISTANCIA	Nº paradas	Consumo energía (KWh)	
VG	1	PTO	1	12	19	10	21	5	4	16	20	1	30.13	8	3.99
		DIST		3.66	2.77	2.20	6.89	3.25	3.12	2.84	1.97	3.44			
VP	1	PTO	1	9	14	18	8	1	1	1	1	1	21.34	4	1.45
		DIST		4.21	4.09	5.00	2.16	5.88	0.00	0.00	0.00	0.00			
VP	2	PTO	1	17	6	7	11	1	1	1	1	1	27.90	4	1.83
		DIST		4.79	4.03	3.37	4.37	11.34	0.00	0.00	0.00	0.00			
VP	3	PTO	1	3	15	13	2	1	1	1	1	1	25.34	4	1.73
		DIST		5.59	4.93	4.79	2.51	7.52	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0.00
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0.00
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0.00
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0.00
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0.00
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0.00
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
TOTAL												104.72	20.00	8.99	

Por último, automáticamente se genera un gráfico como el de la figura 20 con la ruta que realizan los vehículos.

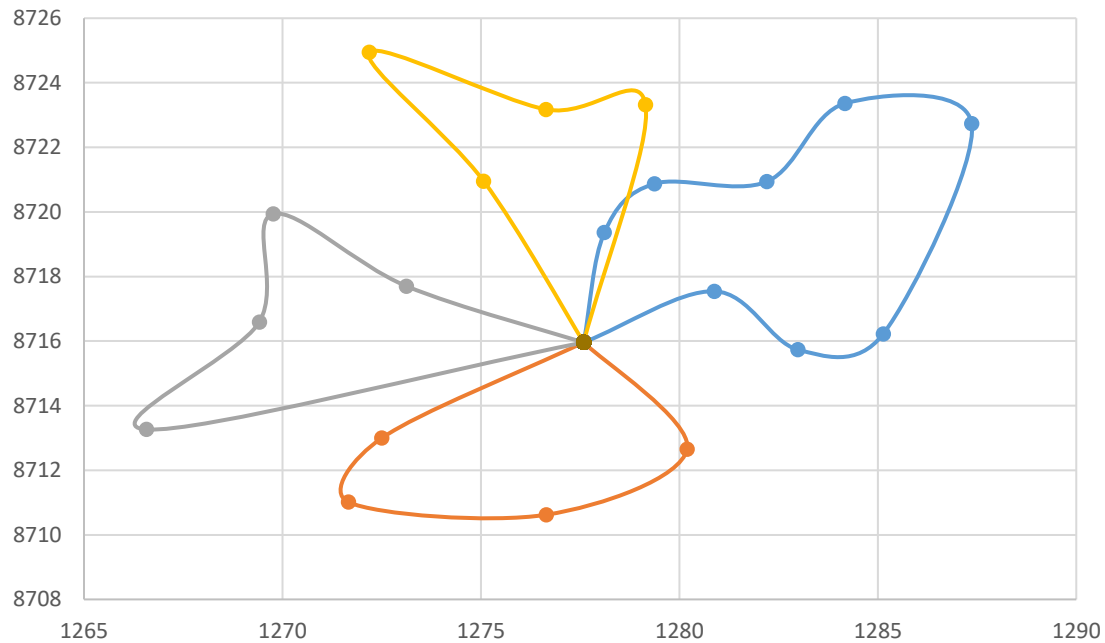


Figura 20. Ejemplo ruta realizada por los vehículos

ANEXO 4: SECUENCIA DE RUTAS DETALLADA

1. ESCENARIO A1

a. OPCIÓN 1, 8 Y 9

Tabla 44. Distribución detallada opción 1, 8 y 9 (Escenario A1 y sentido A)

SENTIDO A													DISTANCIA	Nº paradas	Consumo energía (KWh)
VG	1	PTO	1	20	16	4	5	21	10	19	12	1	30.13	8	3.914968392
		DIST		3.44	1.97	2.84	3.12	3.25	6.89	2.20	2.77	3.66			
VP	1	PTO	1	8	18	14	9	1	1	1	1	1	21.34	4	1.469497567
		DIST		5.88	2.16	5.00	4.09	4.21	0.00	0.00	0.00	0.00			
VP	2	PTO	1	11	7	6	17	1	1	1	1	1	27.90	4	1.992956931
		DIST		11.34	4.37	3.37	4.03	4.79	0.00	0.00	0.00	0.00			
VP	3	PTO	1	2	13	15	3	1	1	1	1	1	25.34	4	1.743677507
		DIST		7.52	2.51	4.79	4.93	5.59	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
TOTAL											104.72	20.00	9.12		

Tabla 45. Distribución detallada opción 1, 8 y 9 (Escenario A1 y sentido B)

SENTIDO B												DISTANCIA	Nº paradas	Consumo energía (KWh)	
VG	1	PTO	1	12	19	10	21	5	4	16	20	1	30.13	8	3.98623771
		DIST		3.66	2.77	2.20	6.89	3.25	3.12	2.84	1.97	3.44			
VP	1	PTO	1	9	14	18	8	1	1	1	1	1	21.34	4	1.452058615
		DIST		4.21	4.09	5.00	2.16	5.88	0.00	0.00	0.00	0.00			
VP	2	PTO	1	17	6	7	11	1	1	1	1	1	27.90	4	1.827392119
		DIST		4.79	4.03	3.37	4.37	11.34	0.00	0.00	0.00	0.00			
VP	3	PTO	1	3	15	13	2	1	1	1	1	1	25.34	4	1.725898135
		DIST		5.59	4.93	4.79	2.51	7.52	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
TOTAL												104.72	20.00	8.99	

b. OPCIÓN 2, 6 Y 7

Tabla 46. Distribución detallada opción 2, 6 y 7 (Escenario A1 y sentido A)

SENTIDO A												DISTANCIA	Nº paradas	Consumo energia (KWh)	
VG	1	PTO	1	12	19	10	21	5	4	16	20	1	30.13	8	3.98623771
		DIST		3.66	2.77	2.20	6.89	3.25	3.12	2.84	1.97	3.44			
VG	2	PTO	1	9	14	8	18	11	7	6	17	1	37.36	8	4.887783642
		DIST		4.21	4.09	4.78	2.16	5.56	4.37	3.37	4.03	4.79			
VP	1	PTO	1	3	15	13	2	1	1	1	1	1	25.34	4	1.725898135
		DIST		5.59	4.93	4.79	2.51	7.52	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
TOTAL												92.83	20.00	10.60	

Tabla 47. Distribución detallada opción 2, 6 y 7 (Escenario A1 y sentido B)

SENTIDO B												DISTANCIA	Nº paradas	Consumo energía (KWh)	
VG	1	PTO	1	20	16	4	5	21	10	19	12	1	30.13	8	3.914968392
		DIST		3.44	1.97	2.84	3.12	3.25	6.89	2.20	2.77	3.66			
VG	2	PTO	1	17	6	7	11	18	8	14	9	1	37.36	8	4.907100447
		DIST		4.79	4.03	3.37	4.37	5.56	2.16	4.78	4.09	4.21			
VP	1	PTO	1	2	13	15	3	1	1	1	1	1	25.34	4	1.743677507
		DIST		7.52	2.51	4.79	4.93	5.59	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
TOTAL												92.83	20.00	10.57	

c. OPCIÓN 3, 4 Y 5

Tabla 48. Distribución detallada opción 3, 4 y 5 (Escenario A1 y sentido A)

SENTIDO A												DISTANCIA	Nº paradas	Consumo energía (KWh)	
VG	1	PTO	1	12	4	5	21	10	19	1	1	1	28.17	6	3.481104598
		DIST		3.66	3.65	3.12	3.25	6.89	2.20	5.40	0.00	0.00			
VG	2	PTO	1	3	15	13	2	16	20	1	1	1	25.69	6	3.299599858
		DIST		5.59	4.93	4.79	2.51	2.45	1.97	3.44	0.00	0.00			
VG	3	PTO	1	17	6	7	11	18	8	14	9	1	37.36	8	4.907100447
		DIST		4.79	4.03	3.37	4.37	5.56	2.16	4.78	4.09	4.21			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
TOTAL												91.21	20.00	11.69	

Tabla 49. Distribución detallada opción 3, 4 y 5 (Escenario A1 y sentido B)

SENTIDO B												DISTANCIA	Nº paradas	Consumo energia (KWh)	
VG	1	PTO	1	19	10	21	5	4	12	1	1	1	28.17	6	3.556604149
		DIST		5.40	2.20	6.89	3.25	3.12	3.65	3.66	0.00	0.00			
VG	2	PTO	1	20	16	2	13	15	3	1	1	1	25.69	6	3.118093432
		DIST		3.44	1.97	2.45	2.51	4.79	4.93	5.59	0.00	0.00			
VG	3	PTO	1	9	14	8	18	11	7	6	17	1	37.36	8	4.887783642
		DIST		4.21	4.09	4.78	2.16	5.56	4.37	3.37	4.03	4.79			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
TOTAL												91.21	20.00	11.56	

d. OPCIÓN 10

Tabla 50. Distribución detallada opción 10 (Escenario A1 y sentido A)

SENTIDO A												DISTANCIA	Nº paradas	Consumo energía (KWh)
VP	1	PTO	1	7	11	18	8	1	1	1	1	26.17	4	1.833615566
		DIST		8.20	4.37	5.56	2.16	5.88	0.00	0.00	0.00			
VP	2	PTO	1	17	6	15	3	1	1	1	1	24.91	4	1.68975191
		DIST		4.79	4.03	5.57	4.93	5.59	0.00	0.00	0.00			
VP	3	PTO	1	10	21	5	4	1	1	1	1	27.60	4	1.922055734
		DIST		7.55	6.89	3.25	3.12	6.79	0.00	0.00	0.00			
VP	4	PTO	1	14	9	19	12	1	1	1	1	20.09	4	1.405270677
		DIST		5.42	4.09	4.16	2.77	3.66	0.00	0.00	0.00			
VP	5	PTO	1	13	2	16	20	1	1	1	1	17.65	4	1.259122232
		DIST		7.28	2.51	2.45	1.97	3.44	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
TOTAL												116.43	20.00	8.11

Tabla 51. Distribución detallada opción 10 (Escenario A1 y sentido B)

SENTIDO B												DISTANCIA	Nº paradas	Consumo energía (KWh)
VP	1	PTO	1	8	18	11	7	1	1	1	1	26.17	4	1.749294314
		DIST		5.88	2.16	5.56	4.37	8.20	0.00	0.00	0.00			
VP	2	PTO	1	3	15	6	17	1	1	1	1	24.91	4	1.720483195
		DIST		5.59	4.93	5.57	4.03	4.79	0.00	0.00	0.00			
VP	3	PTO	1	4	5	21	10	1	1	1	1	27.60	4	1.856880987
		DIST		6.79	3.12	3.25	6.89	7.55	0.00	0.00	0.00			
VP	4	PTO	1	12	19	9	14	1	1	1	1	20.09	4	1.345568958
		DIST		3.66	2.77	4.16	4.09	5.42	0.00	0.00	0.00			
VP	5	PTO	1	20	16	2	13	1	1	1	1	17.65	4	1.157793189
		DIST		3.44	1.97	2.45	2.51	7.28	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
TOTAL												116.43	20.00	7.83

2. ESCENARIO A2

a. OPCIÓN 1, 8 Y 9

Tabla 52. Distribución detallada opción 1, 8 y 9 (Escenario A2 y sentido A)

SENTIDO A												DISTANCIA	Nº paradas	Consumo energía (KWh)	
VG	1	PTO	1	9	14	8	18	11	7	6	15	1	63.21	8	8.44349609
		DIST		20.32	4.09	4.78	2.16	5.56	4.37	3.37	5.57	13.00			
VP	1	PTO	1	12	19	10	21	1	1	1	1	1	38.45	4	2.658032159
		DIST		15.38	2.77	2.20	6.89	11.20	0.00	0.00	0.00	0.00			
VP	2	PTO	1	13	3	17	20	1	1	1	1	1	37.26	4	2.49976473
		DIST		11.32	2.72	3.79	5.26	14.18	0.00	0.00	0.00	0.00			
VP	3	PTO	1	2	16	4	5	1	1	1	1	1	28.13	4	1.927482416
		DIST		10.10	2.45	2.84	3.12	9.62	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
TOTAL											167.05	20.00	15.53		

Tabla 53. Distribución detallada opción 1, 8 y 9 (Escenario A2 y sentido B)

SENTIDO B												DISTANCIA	Nº paradas	Consumo energía (KWh)	
VG	1	PTO	1	15	6	7	11	18	8	14	9	1	63.21	8	8.129571014
		DIST		13.00	5.57	3.37	4.37	5.56	2.16	4.78	4.09	20.32			
VP	1	PTO	1	21	10	19	12	1	1	1	1	1	38.45	4	2.605592097
		DIST		11.20	6.89	2.20	2.77	15.38	0.00	0.00	0.00	0.00			
VP	2	PTO	1	20	17	3	13	1	1	1	1	1	37.26	4	2.601731082
		DIST		14.18	5.26	3.79	2.72	11.32	0.00	0.00	0.00	0.00			
VP	3	PTO	1	5	4	16	2	1	1	1	1	1	28.13	4	1.923755656
		DIST		9.62	3.12	2.84	2.45	10.10	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
TOTAL												167.05	20.00	15.26	

b. OPCIÓN 2, 3, 4, 5, 6 Y 7

Tabla 54. Distribución detallada opción 2, 3, 4, 5, 6 y 7 (Escenario A2 y sentido A)

SENTIDO A												DISTANCIA	Nº paradas	Consumo energía (KWh)	
VG	1	PTO	1	21	10	19	9	14	12	4	5	1	53.04	8	7.019653477
		DIST		11.20	6.89	2.20	4.16	4.09	8.11	3.65	3.12	9.62			
VG	2	PTO	1	3	17	8	18	11	7	6	15	1	56.59	8	7.414240637
		DIST		14.03	3.79	4.74	2.16	5.56	4.37	3.37	5.57	13.00			
VP	1	PTO	1	13	20	16	2	1	1	1	1	1	29.93	4	2.073877104
		DIST		11.32	4.09	1.97	2.45	10.10	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
TOTAL												139.56	20.00	16.51	

Tabla 55. Distribución detallada opción 2, 3, 4, 5, 6 y 7 (Escenario A2 y sentido B)

SENTIDO B												DISTANCIA	Nº paradas	Consumo energía (KWh)	
VG	1	PTO	1	5	4	12	14	9	19	10	21	1	53.04	8	6.886604007
		DIST		9.62	3.12	3.65	8.11	4.09	4.16	2.20	6.89	11.20			
VG	2	PTO	1	15	6	7	11	18	8	17	3	1	56.59	8	7.422650982
		DIST		13.00	5.57	3.37	4.37	5.56	2.16	4.74	3.79	14.03			
VP	1	PTO	1	2	16	20	13	1	1	1	1	1	29.93	4	2.023825452
		DIST		10.10	2.45	1.97	4.09	11.32	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
										TOTAL	139.56	20.00	16.33		

c. OPCIÓN 10

Tabla 56. Distribución detallada opción 10 (Escenario A2 y sentido A)

SENTIDO A												DISTANCIA	Nº paradas	Consumo energía (KWh)
VP	1	PTO	1	8	18	14	9	1	1	1	1	53.79	4	3.69389886
		DIST		22.23	2.16	5.00	4.09	20.32	0.00	0.00	0.00			
VP	2	PTO	1	15	3	13	2	1	1	1	1	33.26	4	2.327463183
		DIST		13.00	4.93	2.72	2.51	10.10	0.00	0.00	0.00			
VP	3	PTO	1	16	20	4	5	1	1	1	1	31.47	4	2.18122514
		DIST		12.37	1.97	4.39	3.12	9.62	0.00	0.00	0.00			
VP	4	PTO	1	6	11	7	17	1	1	1	1	51.60	4	3.558044552
		DIST		18.14	7.40	4.37	3.87	17.82	0.00	0.00	0.00			
VP	5	PTO	1	12	19	10	21	1	1	1	1	38.45	4	2.658032159
		DIST		15.38	2.77	2.20	6.89	11.20	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
TOTAL												208.57	20.00	14.42

Tabla 57. Distribución detallada opción 10 (Escenario A2 y sentido B)

SENTIDO B												DISTANCIA	Nº paradas	Consumo energía (KWh)
VP	1	PTO	1	9	14	18	8	1	1	1	1	53.79	4	3.670744439
		DIST		20.32	4.09	5.00	2.16	22.23	0.00	0.00	0.00			
VP	2	PTO	1	2	13	3	15	1	1	1	1	33.26	4	2.226316294
		DIST		10.10	2.51	2.72	4.93	13.00	0.00	0.00	0.00			
VP	3	PTO	1	5	4	20	16	1	1	1	1	31.47	4	2.127469151
		DIST		9.62	3.12	4.39	1.97	12.37	0.00	0.00	0.00			
VP	4	PTO	1	17	7	11	6	1	1	1	1	51.60	4	3.506569941
		DIST		17.82	3.87	4.37	7.40	18.14	0.00	0.00	0.00			
VP	5	PTO	1	21	10	19	12	1	1	1	1	38.45	4	2.605592097
		DIST		11.20	6.89	2.20	2.77	15.38	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
TOTAL												208.57	20.00	14.14

3. ESCENARIO B1

a. OPCIÓN 1, 8 Y 9

Tabla 58. Distribución detallada opción 1, 8 y 9 (Escenario B1 y sentido A)

SENTIDO A												DISTANCIA	Nº paradas	Consumo energía (KWh)	
VG	1	PTO	1	5	10	9	15	19	8	16	11	1	101.35	8	17.95269563
		DIST		8.74	16.36	10.76	11.05	12.75	10.10	7.44	9.57	14.58			
VP	1	PTO	1	20	17	12	6	1	1	1	1	1	71.50	4	6.416987286
		DIST		27.18	13.33	8.05	8.24	14.70	0.00	0.00	0.00	0.00			
VP	2	PTO	1	13	2	3	4	1	1	1	1	1	52.41	4	4.397630763
		DIST		5.52	8.14	10.61	9.53	18.61	0.00	0.00	0.00	0.00			
VP	3	PTO	1	7	18	14	21	1	1	1	1	1	62.31	4	5.418185538
		DIST		13.99	6.81	15.22	15.86	10.43	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
TOTAL												287.57	20.00	34.19	

Tabla 59. Distribución detallada opción 1, 8 y 9 (Escenario B1 y sentido B)

SENTIDO B												DISTANCIA	Nº paradas	Consumo energía (KWh)	
VG	1	PTO	1	11	16	8	19	15	9	10	5	1	101.35	8	17.89582227
		DIST		14.58	9.57	7.44	10.10	12.75	11.05	10.76	16.36	8.74			
VP	1	PTO	1	6	12	17	20	1	1	1	1	1	71.50	4	6.046588051
		DIST		14.70	8.24	8.05	13.33	27.18	0.00	0.00	0.00	0.00			
VP	2	PTO	1	4	3	2	13	1	1	1	1	1	52.41	4	4.737561821
		DIST		18.61	9.53	10.61	8.14	5.52	0.00	0.00	0.00	0.00			
VP	3	PTO	1	21	14	18	7	1	1	1	1	1	62.31	4	5.442126241
		DIST		10.43	15.86	15.22	6.81	13.99	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
TOTAL												287.57	20.00	34.12	

b. OPCIÓN 2, 3, 4, 5, 6 Y 7

Tabla 60. Distribución detallada opción 2, 3, 4, 5, 6 y 7 (Escenario B1 y sentido A)

SENTIDO A												DISTANCIA	Nº paradas	Consumo energía (KWh)	
VG	1	PTO	1	21	7	18	14	20	17	12	6	1	100.66	8	17.71534598
		DIST		10.43	9.44	6.81	15.22	14.44	13.33	8.05	8.24	14.70			
VG	2	PTO	1	11	16	8	19	15	9	10	5	1	101.35	8	17.89582227
		DIST		14.58	9.57	7.44	10.10	12.75	11.05	10.76	16.36	8.74			
VP	1	PTO	1	13	2	3	4	1	1	1	1	1	52.41	4	4.397630763
		DIST		5.52	8.14	10.61	9.53	18.61	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
TOTAL												254.43	20.00	40.01	

Tabla 61. Distribución detallada opción 2, 3, 4, 5, 6 y 7 (Escenario B1 y sentido B)

SENTIDO B												DISTANCIA	Nº paradas	Consumo energía (KWh)	
VG	1	PTO	1	6	12	17	20	14	18	7	21	1	100.66	8	17.88915081
		DIST		14.70	8.24	8.05	13.33	14.44	15.22	6.81	9.44	10.43			
VG	2	PTO	1	5	10	9	15	19	8	16	11	1	101.35	8	17.95269563
		DIST		8.74	16.36	10.76	11.05	12.75	10.10	7.44	9.57	14.58			
VP	1	PTO	1	13	2	3	4	1	1	1	1	1	52.41	4	4.397630763
		DIST		5.52	8.14	10.61	9.53	18.61	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
TOTAL												254.43	20.00	40.24	

c. OPCIÓN 10

Tabla 62. Distribución detallada opción 10 (Escenario B1 y sentido A)

SENTIDO A												DISTANCIA	Nº paradas	Consumo energía (KWh)
VP	1	PTO	1	6	12	10	5	1	1	1	1	58.96	4	5.161730326
		DIST		14.70	8.24	10.92	16.36	8.74	0.00	0.00	0.00			
VP	2	PTO	1	17	20	14	21	1	1	1	1	82.70	4	7.416409248
		DIST		28.64	13.33	14.44	15.86	10.43	0.00	0.00	0.00			
VP	3	PTO	1	9	15	19	8	1	1	1	1	83.09	4	7.164704587
		DIST		21.24	11.05	12.75	10.10	27.94	0.00	0.00	0.00			
VP	4	PTO	1	13	7	18	2	1	1	1	1	47.75	4	4.056921987
		DIST		5.52	9.09	6.81	15.53	10.80	0.00	0.00	0.00			
VP	5	PTO	1	11	16	4	3	1	1	1	1	55.14	4	4.829797203
		DIST		14.58	9.57	8.83	9.53	12.64	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
TOTAL											327.64	20.00	28.63	

Tabla 63. Distribución detallada opción 10 (Escenario B1 y sentido B)

SENTIDO B												DISTANCIA	Nº paradas	Consumo energía (KWh)
VP	1	PTO	1	5	10	12	6	1	1	1	1	58.96	4	5.114652591
		DIST		8.74	16.36	10.92	8.24	14.70	0.00	0.00	0.00			
VP	2	PTO	1	21	14	20	17	1	1	1	1	82.70	4	6.998523217
		DIST		10.43	15.86	14.44	13.33	28.64	0.00	0.00	0.00			
VP	3	PTO	1	8	19	15	9	1	1	1	1	83.09	4	7.318255278
		DIST		27.94	10.10	12.75	11.05	21.24	0.00	0.00	0.00			
VP	4	PTO	1	2	18	7	13	1	1	1	1	47.75	4	4.266508461
		DIST		10.80	15.53	6.81	9.09	5.52	0.00	0.00	0.00			
VP	5	PTO	1	3	4	16	11	1	1	1	1	55.14	4	4.781446468
		DIST		12.64	9.53	8.83	9.57	14.58	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
TOTAL											327.64	20.00	28.48	

4. ESCENARIO B2

a. OPCIÓN 1, 8 Y 9

Tabla 64. Distribución detallada opción 1, 8 y 9 (Escenario B2 y sentido A)

SENTIDO A												DISTANCIA	Nº paradas	Consumo energía (KWh)	
VG	1	PTO	1	3	11	9	10	12	17	20	14	1	149.77	8	25.88862029
		DIST		21.43	12.20	13.74	10.76	10.92	8.05	13.33	14.44	44.90			
VP	1	PTO	1	4	5	6	21	1	1	1	1	1	105.17	4	9.095249786
		DIST		27.83	18.76	10.37	10.58	37.64	0.00	0.00	0.00	0.00			
VP	2	PTO	1	2	13	7	18	1	1	1	1	1	74.21	4	6.354683562
		DIST		20.17	8.14	9.09	6.81	30.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
VP	3	PTO	1	19	15	8	16	1	1	1	1	1	116.15	4	10.33926232
		DIST		51.25	12.75	8.30	7.44	36.40	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
										TOTAL	445.30	20.00	51.68		

Tabla 65. Distribución detallada opción 1, 8 y 9 (Escenario B2 y sentido B)

SENTIDO B												DISTANCIA	Nº paradas	Consumo energía (KWh)	
VG	1	PTO	1	14	20	17	12	10	9	11	3	1	149.77	8	27.0854169
		DIST		44.90	14.44	13.33	8.05	10.92	10.76	13.74	12.20	21.43			
VP	1	PTO	1	21	6	5	4	1	1	1	1	1	105.17	4	9.23633971
		DIST		37.64	10.58	10.37	18.76	27.83	0.00	0.00	0.00	0.00			
VP	2	PTO	1	18	7	13	2	1	1	1	1	1	74.21	4	6.580764718
		DIST		30.00	6.81	9.09	8.14	20.17	0.00	0.00	0.00	0.00			
VP	3	PTO	1	16	8	15	19	1	1	1	1	1	116.15	4	9.907390019
		DIST		36.40	7.44	8.30	12.75	51.25	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
TOTAL												445.30	20.00	52.81	

b. OPCIÓN 2, 3, 4, 5, 6 Y 7

Tabla 66. Distribución detallada opción 2, 3, 4, 5, 6 y 7 (Escenario B2 y sentido A)

SENTIDO A												DISTANCIA	Nº paradas	Consumo energia (KWh)	
VG	1	PTO	1	4	16	8	19	15	10	9	11	1	144.63	8	25.24999007
		DIST		27.83	8.83	7.44	10.10	12.75	19.82	10.76	13.74	33.36			
VG	2	PTO	1	18	14	20	17	12	6	5	3	1	138.27	8	24.70881176
		DIST		30.00	15.22	14.44	13.33	8.05	8.24	10.37	17.17	21.43			
VP	1	PTO	1	7	21	13	2	1	1	1	1	1	79.61	4	7.097223852
		DIST		32.42	9.44	9.44	8.14	20.17	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
TOTAL												362.51	20.00	57.06	

Tabla 67. Distribución detallada opción 2, 3, 4, 5, 6 y 7 (Escenario B2 y sentido B)

SENTIDO B												DISTANCIA	Nº paradas	Consumo energía (KWh)	
VG	1	PTO	1	11	9	10	15	19	8	16	4	1	144.63	8	25.90628227
		DIST		33.36	13.74	10.76	19.82	12.75	10.10	7.44	8.83	27.83			
VG	2	PTO	1	3	5	6	12	17	20	14	18	1	138.27	8	24.19515497
		DIST		21.43	17.17	10.37	8.24	8.05	13.33	14.44	15.22	30.00			
VP	1	PTO	1	2	13	21	7	1	1	1	1	1	79.61	4	6.779194133
		DIST		20.17	8.14	9.44	9.44	32.42	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
TOTAL												362.51	20.00	56.88	

c. OPCIÓN 10

Tabla 68. Distribución detallada opción 10 (Escenario B2 y sentido A)

SENTIDO A												DISTANCIA	Nº paradas	Consumo energía (KWh)
VP	1	PTO	1	21	17	20	14	1	1	1	1	131.81	4	11.44140422
		DIST		37.64	21.50	13.33	14.44	44.90	0.00	0.00	0.00			
VP	2	PTO	1	6	12	10	5	1	1	1	1	117.96	4	10.32228132
		DIST		44.92	8.24	10.92	16.36	37.52	0.00	0.00	0.00			
VP	3	PTO	1	8	19	15	9	1	1	1	1	124.30	4	10.79221279
		DIST		43.76	10.10	12.75	11.05	46.64	0.00	0.00	0.00			
VP	4	PTO	1	3	11	16	4	1	1	1	1	79.85	4	6.90133712
		DIST		21.43	12.20	9.57	8.83	27.83	0.00	0.00	0.00			
VP	5	PTO	1	18	7	13	2	1	1	1	1	74.21	4	6.580764718
		DIST		30.00	6.81	9.09	8.14	20.17	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
TOTAL												528.13	20.00	46.04

Tabla 69. Distribución detallada opción 10 (Escenario B2 y sentido B)

SENTIDO B												DISTANCIA	Nº paradas	Consumo energía (KWh)
VP	1	PTO	1	14	20	17	21	1	1	1	1	131.81	4	11.53359126
		DIST		44.90	14.44	13.33	21.50	37.64	0.00	0.00	0.00			
VP	2	PTO	1	5	10	12	6	1	1	1	1	117.96	4	10.2397765
		DIST		37.52	16.36	10.92	8.24	44.92	0.00	0.00	0.00			
VP	3	PTO	1	9	15	19	8	1	1	1	1	124.30	4	10.87487296
		DIST		46.64	11.05	12.75	10.10	43.76	0.00	0.00	0.00			
VP	4	PTO	1	4	16	11	3	1	1	1	1	79.85	4	7.017553479
		DIST		27.83	8.83	9.57	12.20	21.43	0.00	0.00	0.00			
VP	5	PTO	1	2	13	7	18	1	1	1	1	74.21	4	6.354683562
		DIST		20.17	8.14	9.09	6.81	30.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		PTO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00	0	0
		DIST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
TOTAL												528.13	20.00	46.02